

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico**

**TEMA**

**IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE  
ULTRASONIDO PARA CONTROL DE CALIDAD DE LA SOLDADURA EN  
TUBERÍAS DE PRESIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DIFRACCIÓN POR  
TIEMPO DE VUELO.**

**AUTOR**

**CAMILO INTY DÁVILA ORTIZ**

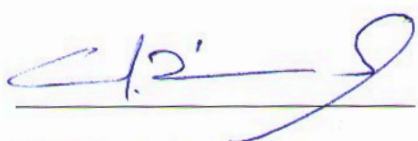
**TUTOR**

**CHRISTIAN ALEXANDER ANRANGO MEDINA**

**Quito, marzo del 2017**

### **Cesión de derechos de autor**

Yo, **Camilo Inty Dávila Ortiz**, con documento de identificación N° **1722171122**, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajo de Titulación: **“Implementación y aplicación del procedimiento de ultrasonido para control de calidad de la soldadura en tuberías de presión mediante la técnica difracción por tiempo de vuelo”**, el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: **Ingeniero Mecánico**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Camilo Inty Dávila Ortiz

C. I. 1722711122

Quito, marzo de 2017

### **Declaratoria de coautoría del docente tutor**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación  
IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE  
ULTRASONIDO PARA CONTROL DE CALIDAD DE LA SOLDADURA EN  
TUBERÍAS DE PRESIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DIFRACCIÓN POR  
TIEMPO DE VUELO realizado por Camilo Inty Dávila Ortiz, obteniendo un producto  
que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica  
Salesiana para ser considerados como Trabajo Final de Titulación.

Quito, marzo del 2017



---

Ing. Christian Alexander Anrango Medina M.Sc., M.E.R

C. I. 1714585237

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a las tres mujeres que han marcado mi vida:

A la mujer que me dio la vida, mi madre Yolanda.

A la mujer a quien entregué mi vida, mi esposa Marlen.

A la mujer por la que doy mi vida, mi hija Daiyu.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la vida y a toda su misteriosa armonía por permitirme ser parte de ella, a cada ser sintiente por haberme permitido tocar en su existencia, a cada Maestro por haberme entregado su enseñanza, a mi familia por darme aliento en los momentos más sombríos de mi vida y a los amigos por acompañarme con una sonrisa y su generosidad en cada momento.

## **Resumen**

Los ensayos no destructivos en la actualidad, son utilizados como una herramienta para controlar la calidad de soldadura aplicada en diferentes elementos de la industria, y de esta manera asegurar el buen funcionamiento a través del tiempo y evitar fallas catastróficas que provoquen pérdida de recursos.

Uno de los ensayos más difundidos a nivel mundial es el de ultrasonido, en el cual existe una ramificación de técnicas, cuya aplicación depende de las características que se requieren evaluar satisfaciendo alguna normativa, código o especificación.

Algunas de las técnicas de ultrasonido que se utilizan para evaluar el cordón de soldadura son de pulso-eco y difracción por tiempo de vuelo, cada una de estas tiene sus beneficios y sus desventajas, sin embargo se ha determinado que la técnica difracción por tiempo de vuelo al generar señales difractadas de los defectos en vez de reflejadas disminuye significativamente el enmascaramiento de las discontinuidades aumentando de esta manera la exactitud de la capacidad de dimensionamiento, siempre y cuando la técnica sea aplicada a placas cuyos espesores sean mayores a 13 mm hasta 300 mm.

En conformidad con el código ASME V, apéndice 3, los patrones o bloques de calibración para tubería son aplicables cuando tienen un diámetro mayor a 500 mm o 20 pulgadas, lo cual quiere decir que la técnica Difracción por tiempo de vuelo no puede ser aplicada para tuberías con diámetro menor al indicado en el código ASME.

**Palabras claves:** difracción, tiempo, vuelo, control, soldadura

## **Abstract**

In the present the Non Destructive Testing, are use as an instrument for control the quality of welding that are applicated in differents elements of industry, and this way are guarantee the good operation throught the time and avoid catastrophic failure that incite loss of resources.

One of the most recognized Non Destructive Testing around the world is the Ultrasonic Testing, whose application depends of characteristics that be evaluate throught codes or specifications.

Some of this techniques of Ultrasonic that uses for evaluate weld are: pulso-echo and time of flight diffraction techniques, each has advantages and limitations, however it has been determined that Time Of Flight Diffraction technique generate diffracted signals of defects instead of be reflected signals, this allow decrease cover discontinuity and increase the accurate sizing capability, always that the technique are applicated in plates with thicknesses higher of 13 mm until 300 mm.

In accordance with ASME V code, appendix 3, the calibration blocks for piping are apliccable when have a diameter higher of 500 mm or 20 inches, wich means that Time Of Flight Diffraction technique can't be applicated in pipping under ASME V code.

**Keywords:** diffraction, time, quality, control, flight.

## Índice

Introducción .....	18
CAPÍTULO 1.....	20
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y CONTROL DE CALIDAD.....	20
1.1 Introducción .....	20
1.2 Selección del método de Ensayo No Destructivo.....	20
1.3 Inspección de Ensayos No Destructivos en recipientes de presión. ....	21
CAPÍTULO 2.....	23
ENSAYO NO DESTRUCTIVO: TÉCNICA DE ULTRASONIDO.....	23
2.1 Historia.....	23
2.2 Movimiento de ondas y ecuación de las ondas .....	23
2.3 Ondas guiadas .....	27
2.4 Propiedades de las ondas de sonido .....	29
CAPÍTULO 3.....	41
ULTRASONIDO: TÉCNICA DIFRACCIÓN POR TIEMPO DE VUELO.....	41
3.1 Desarrollo histórico de la técnica: difracción por tiempo de vuelo .....	41
3.2 Bases teóricas de la difracción por tiempo de vuelo.....	45
3.3 Amplitud de la señal y comparación con otras técnicas .....	51
3.4 Procesamiento, Visualización y análisis de los datos de Tiempo de vuelo .....	65
3.5 Geometrías complejas.....	81
3.6 Soldaduras a tope .....	82
3.7 Aplicaciones de la técnica TOFD .....	85



3.8 Turbinas y componentes de generadores .....	86
CAPÍTULO 4.....	91
PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN DE SOLDADURA, POR ULTRASONIDO CON LA TÉCNICA DIFRACCIÓN POR TIEMPO DE VUELO SEGÚN ASME VIII.....	91
4.1 Objetivo.....	91
4.2 Alcance .....	91
4.3 Documentos de referencia.....	91
4.4 Personal responsable de la aplicación del procedimiento.....	92
4.5 Procedimiento .....	93
CAPÍTULO 5.....	109
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
5.1 Conclusiones .....	109
5.2 Recomendaciones .....	109
Bibliografía .....	111

## **Glosario**

END	Ensayo No Destructivo
NF	Near Field
TOFD	Time of Flight Diffraction
SAFT	Synthetic Aperture Focusing Technique
PWR	Pressurized Water Reactor

### **Lista de tablas**

Tabla 1. Amplitudes previstas para las técnicas pulso eco y TOFD.....	57
Tabla 2. Resultado de la comparación del tamaño de un defecto a partir de 3 técnicas de inspección.....	86

## Lista de figuras

Figura 1. Esquema de las ondas ultrasónicas longitudinales. ....	25
Figura 2. Esquema de ondas ultrasónicas transversales.....	26
Figura 3. Esquema de ondas de Rayleigh .....	28
Figura 4. Esquema de ondas de lamb.....	29
Figura 5 Refracción en dos materiales .....	35
Figura 6. Campo cercano .....	37
Figura 7. Campos cercano y lejano de un haz ultrasónico.....	40
Figura 8. Representación del campo cercano y campo lejano .....	40
Figura 9. Esquema de inspección utilizando la técnica TOFD .....	44
Figura 10. Representación de la señal de salida en el receptor.....	46
Figura 11. Dimensionamiento de una fisura de fatiga con TOFD .....	49
Figura 12. Posición de una discontinuidad .....	50
Figura 13. Ubicación elíptica de la punta de una fisura por diferencias de tiempo ....	51
Figura 14. Optimización de transductor de haz angular para TOFD en acero utilizando ondas de compresión.....	53
Figura 15. Geometría de los reflectores de calibración para la técnica pulso-eco y TOFD .....	56
Figura 16. Esquema de la aplicación de la técnica pulso eco para identificación de fisuras circulares y onduladas .....	60
Figura 17. Esquema de la aplicación de la técnica TOFD para identificación de fisuras circulares inclinadas 7° .....	62
Figura 18. Esquema de la aplicación de la técnica TOFD para identificación de fisuras circulares inclinadas 7° .....	63
Figura 19. Coeficientes de difracción .....	65
Figura 20 Esquema del desplazamiento simétrico del par de palpadores.....	70

Figura 21. Curvas teóricas entre desplazamiento y retardo de la señal de difracción	73
Figura 22. Barrido TOFD utilizando el cursor.....	74
Figura 23. Generación de todas las señales de un solo defecto .....	75
Figura 24. Medición del perfil de una fisura mediante el uso del cursor.....	77
Figura 25. Defecto plano rectangular equidistante al receptor y transmisor .....	78
Figura 26. Superficies isócronas en una fisura semi-circular .....	79
Figura 27. Barrido TOFD, scan-B indicando el brillo que produce un defecto semi-circular .....	81
Figura 28. Ubicación de los pares de palpadores para la inspección en una junta en T .....	83
Figura 29. Barrido TOFD, scan-B para junta soldada en T .....	84
Figura 30. Bloque plano de calibración para una zona de referencia .....	98
Figura 31. Bloque plano de calibración para varias zonas de referencia.....	99
Figura 32 Compensación del escaneo .....	101

## **Introducción**

En los últimos decenios, el control y aseguramiento de la calidad ha sido parte fundamental dentro de la puesta en marcha de proyectos en el territorio nacional, esto ha permitido asegurar el desarrollo adecuado de cada proyecto manejando estándares internacionales de normas, especificaciones y códigos aplicables.

Los ensayos no destructivos permiten localizar defectos tales como fisuras o discontinuidades que podrían acarrear peligros en la integridad estructural de un componente. Usualmente un ensayo no destructivo consiste en la evaluación de la interacción de diversas formas de energía con esos defectos, lo cual se consigue aplicando pulsos de energía dentro del material que podría contener.

El desarrollo y la aplicación de la tecnología por ultrasonido es una técnica que ha alcanzado la fase de madurez a comienzos del siglo 21, iniciando en el campo de la medicina y siguiendo en el campo industrial a inicios de 1980. A inicios de 1990 la tecnología de ultrasonido fue incorporada como un nuevo método de ensayos no destructivos.

La mejora continua en el proceso de control de calidad en la soldadura, corrobora la elaboración, implementación y aplicación de un procedimiento utilizando Ultrasonido – Difracción por tiempo de vuelo , ya que en la mayoría de proyectos se utiliza el método de radiografía industrial y la técnica Ultrasonido- Arreglo de fases, sin embargo se busca un método que sea seguro y fiable, que signifique una disminución de riesgo al llevar a cabo la inspección, y el método propuesto se ajusta a estos requerimientos.

De estos requerimientos surge la elaboración de un procedimiento que asegure y controle la calidad de la soldadura en la tubería de presión basada en el código internacional ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sección V, artículo 4.

Las juntas soldadas en tubería de presión dependerán de la aplicación de la misma, ya que pueden aplicar para fluidos de servicio, para condiciones cíclicas severas o para servicio a elevadas temperaturas. En todas las aplicaciones antes mencionadas existe una preparación de las juntas a ser soldadas, que permite la mejor adecuación del material de aporte como del material en bruto.

Las juntas soldadas para tubería de presión tienen un espesor que varía entre 6 mm sobre los 22 mm, conforme a este espesor las características de la soldadura, así como el tipo de junta (cóncava o convexa), permitirán evaluar la conformidad de la soldadura bajo criterios de aceptación y rechazo aplicables para cada diseño.

## **CAPÍTULO 1**

### **ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y CONTROL DE CALIDAD**

#### **1.1 Introducción.**

Los Ensayos No Destructivos (END) incluyen actividades de prueba, inspección y examen, las cuales implican la medición u observación de un objeto para determinar algunas características o para determinar si contiene irregularidades, discontinuidades o defectos. (ASM International, 1997)

Los términos de irregularidad, discontinuidad o defecto se pueden utilizar indistintamente; sin embargo se debe tomar en cuenta que conforme las especificaciones, y códigos se pueden dar lugar a definiciones diferentes de estos términos.

Todos estos términos describen lo que se busca al realizar los END que es localizar, encontrar o determinar en el objeto defectos que puedan ser aceptables o rechazables.

#### **1.2 Selección del método de Ensayo No Destructivo.**

Para realizar la selección de un método de END, o a su vez una combinación de métodos de END, se requiere una clara comprensión del problema a resolver.

Existen varias maneras diferentes de comparación para la selección de métodos de END, por ello se recomienda que la comparación debe ser desarrollada específicamente para cada área de END y su aplicación. La validación final de cualquier protocolo de END dependerá de las pruebas de aceptación que se estén llevando a cabo utilizando patrones de calibración adecuados.

Los END pueden ser divididos en nueve áreas distintas (ASM International, 1997):



- Evaluación y detección de defectos
- Evaluación y detección de fugas
- Evaluación y metrología (medición de la dimensión)
- Evaluación y determinación de la locación
- Caracterización de la microestructura o estructura
- Estimación de las propiedades mecánicas o físicas
- Tensión y la determinación de la respuesta dinámica
- Análisis de identificación
- Determinación de la composición química

### **1.3 Inspección de Ensayos No Destructivos en recipientes de presión.**

Los recipientes de presión son considerados todos aquellos recipientes que contengan un fluido en su interior, el cual funcione u opere, bajo presión.

Los recipientes de presión, así como los recipientes para combustibles y nucleares se fabrican en conformidad con las normas aplicables de la Sociedad Americana de ingenieros mecánicos (ASME), conforme lo indicado en ASME BPVC Sección V, Artículo 4.

La inspección mediante ensayos no destructivos es sólo una parte de los requisitos de inspección, ya que los propios materiales deben ser verificados antes de la soldadura.

### **1.3.1 Métodos de Inspección con Ensayos No Destructivos**

Un apéndice de cada sección del código ASME, establece los métodos para realizar la inspección utilizando END para detectar discontinuidades internas de la superficie en los materiales. Existen cuatro métodos de inspección que son aceptables: inspección con ultrasonido, radiografía, partículas magnéticas, y líquidos penetrantes. Todo el personal que realiza END debe estar calificado y certificado bajo procedimientos SNT-TC-1A

## **CAPÍTULO 2**

### **ENSAYO NO DESTRUCTIVO: TÉCNICA DE ULTRASONIDO**

#### **2.1 Historia**

La técnica de ultrasonido ha sido muy utilizada desde la década de los 80's, especialmente en el área de la medicina, sin embargo se tiene conocimiento que en los años 40's el Dr. F. Firestone desarrolló el primer instrumento de pulso-eco para detectar defectos en los materiales. (Smilie, 1997), de esta manera se empieza a evaluar y analizar las bondades de utilizar la propagación de ondas por ultrasonido para detectar defectos en diversos materiales relacionados con áreas de ingeniería dando como resultado la aceptación del método.

#### **2.2 Movimiento de ondas y ecuación de las ondas**

##### **2.2.1 Ondas en una dimensión.**

Conforme el movimiento ondulatorio, una onda en una dimensión puede desplazarse hacia la izquierda, hacia la derecha, o a su vez pueden superponerse, la ecuación de la onda en una dimensión debe tomar en cuenta estas tres condiciones para conocer el valor de la posición de cualquier punto del medio en que se propaga la perturbación, para ello se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

a) Si el movimiento de la onda es hacia la derecha

Ecuación. 1

$$\frac{\partial y}{\partial x} = -\frac{1}{v} \frac{\partial y}{\partial t}$$

La ecuación 1 permite verificar todas las soluciones para el caso  $y = f(x - vt)$ .

b) Si el movimiento de la onda es hacia la izquierda

Ecuación. 2

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{v} \frac{\partial y}{\partial t}$$

La ecuación 2 permite verificar todas las soluciones para el caso  $y = g(x + vt)$ .

Las ecuaciones (1) y (2) no permiten verificar todas las soluciones posibles para el caso de movimiento de onda en ambas direcciones, por ello se realiza utilizando el caso de superposición, el cual describe la sumatoria de las ondas en ambas direcciones, dando la ecuación:

Ecuación. 3

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

La ecuación 3 describe la ecuación de la onda en una dimensión

### **2.2.2 Modo Longitudinal (una dimensión)**

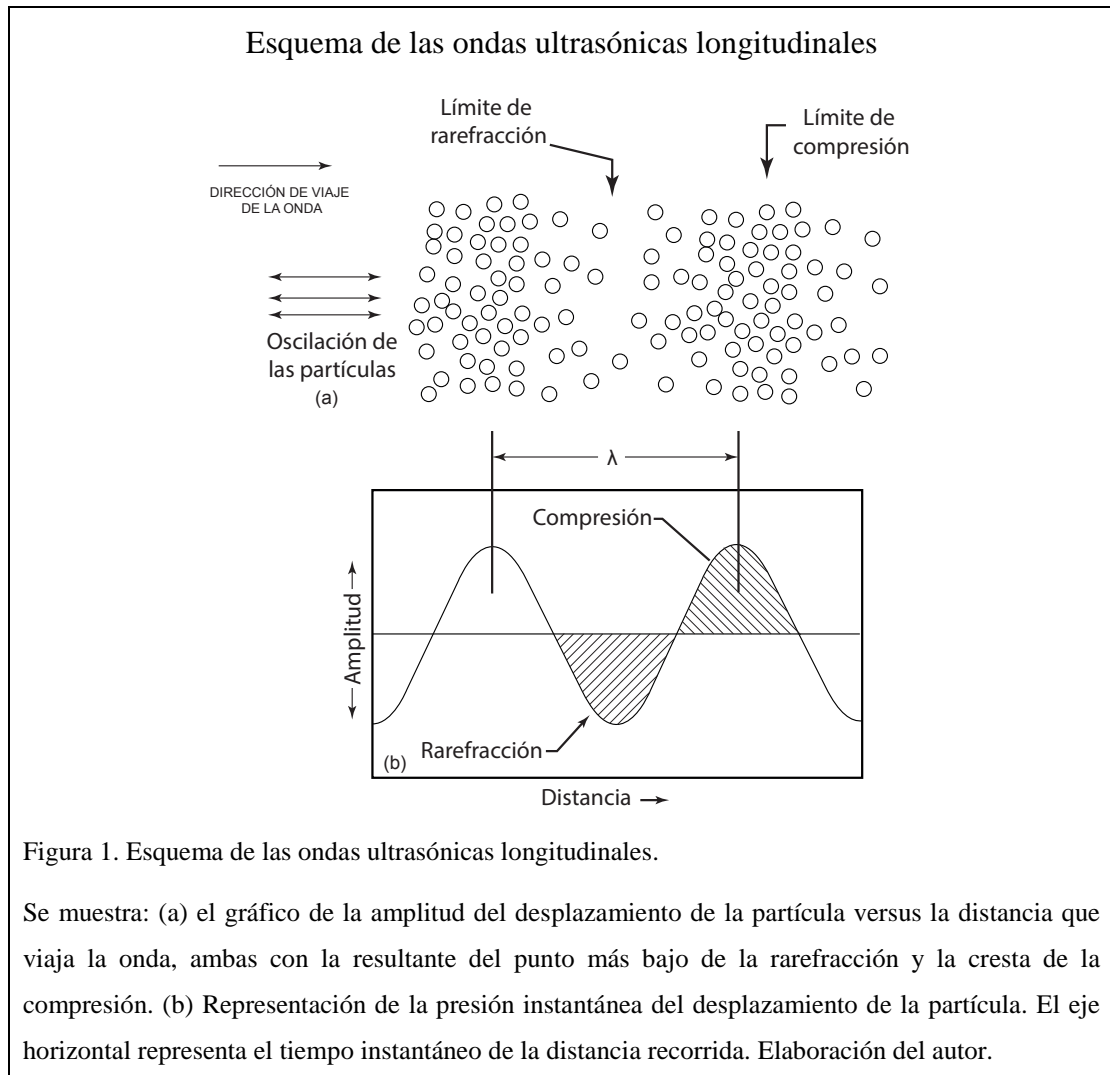
Se les suele llamar ondas de compresión, estas ondas son ampliamente usadas en la inspección de materiales, este tipo de ondas viaja a través de los materiales como una alternancia entre compresión y rarefacción en la cual las partículas transmiten las ondas de vibración de ida y vuelta en la dirección que viajan las ondas.

Las ondas ultrasónicas longitudinales y la correspondiente oscilación de partículas y la resultante rarefacción y compresión se indican en la Figura 4.

La velocidad de fase en una dimensión para ondas longitudinales en un medio homogéneo e isotrópico viene determinado por:

Ecuación. 4

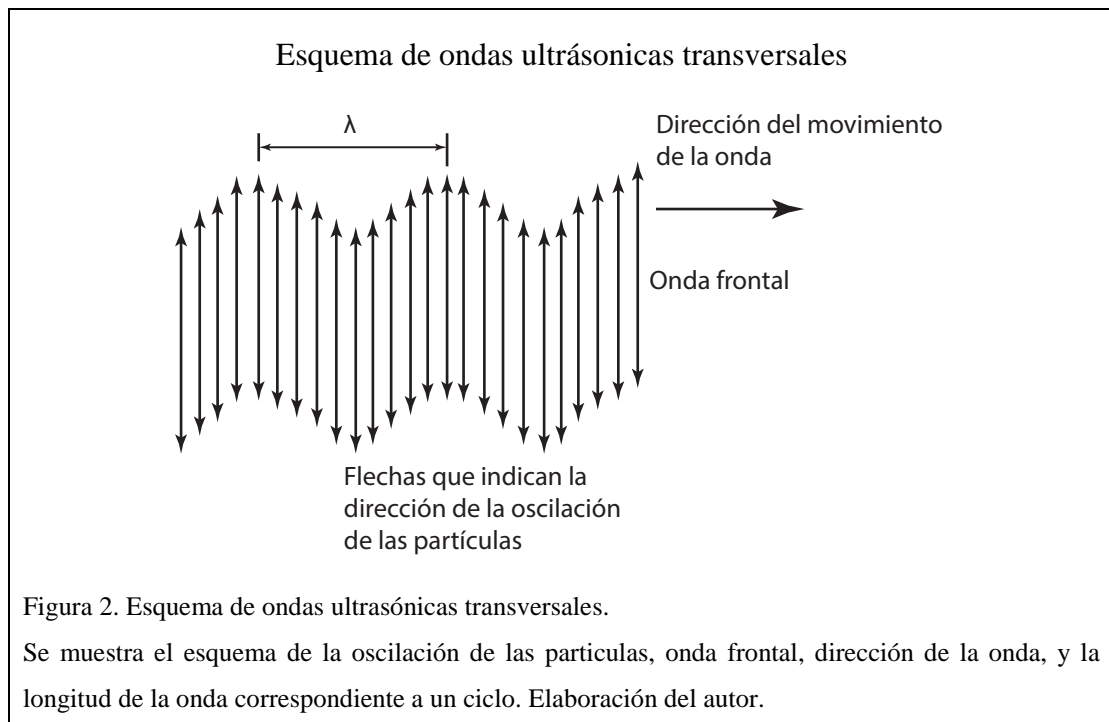
$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$



La velocidad de fase es determinada solamente por la densidad y las propiedades elásticas del material.

### 2.2.3 Modo transversal (una dimensión).

Las ondas transversales se pueden observar fácilmente cuando se hace vibrar una cuerda que se sacude rítmicamente, en el que cada partícula vibra paralelamente en la dirección de la onda. La onda transversal está ilustrada en la Figura 2.



Una onda transversal es excitada cuando se le aplica una fuerza de variación – tiempo para producir un esfuerzo lineal, elástico o comprimido. Consecuentemente todo movimiento vibracional es perpendicular a la dirección de la onda.

La velocidad de fase en una dimensión para ondas transversales en un medio homogéneo e isotrópico viene determinado por:

Ecuación. 5

$$v_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Para materiales con un modulo cortante despreciable como el agua, la velocidad cortante es aproximadamente cero.

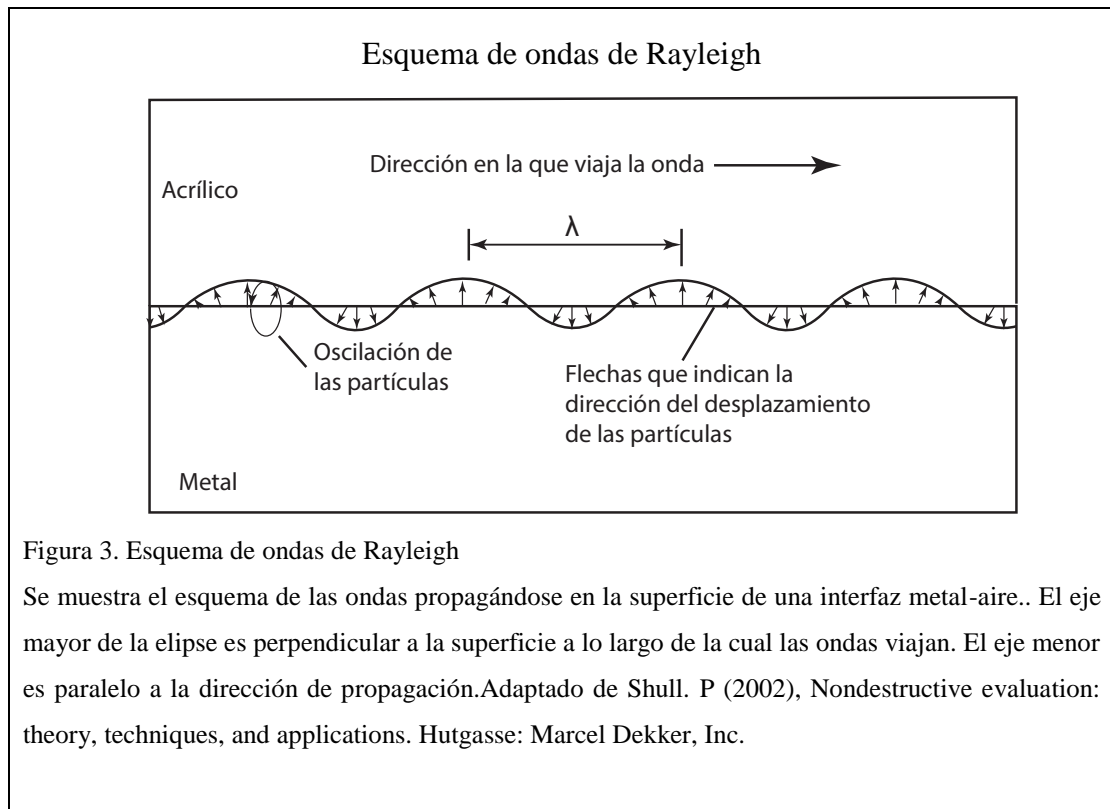
## **2.3 Ondas guiadas**

### **2.3.1 Ondas de Rayleigh**

También llamadas ondas superficiales, son utilizadas en la inspección de materiales y viajan a lo largo de la superficie plana o curva de partes sólidas relativamente gruesas, el movimiento de las partículas está confinado a una profundidad pequeña dentro del material. (ASM International, 1997)

Las ondas superficiales dependen de la atenuación en un material dado, así como las ondas longitudinales o transversales, tienen una velocidad de aproximadamente 90% de la velocidad de la onda transversal en el mismo material. La región dentro de la cual estas ondas se propagan con la energía eficaz no es mucho más gruesa que aproximadamente una longitud de onda por debajo de la superficie del metal. A esta profundidad la energía de onda es de aproximadamente 4% de la energía de las ondas en la superficie, y la amplitud de oscilación disminuye bruscamente a un valor despreciable a mayores profundidades. (ASM International, 1997)

En las ondas de superficie, la oscilación de partículas generalmente sigue una órbita elíptica, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3. El eje mayor de la elipse es perpendicular a la superficie a lo largo de la cual las ondas viajan. El eje menor es paralelo a la dirección de propagación.



### 2.3.2 Ondas de Lamb

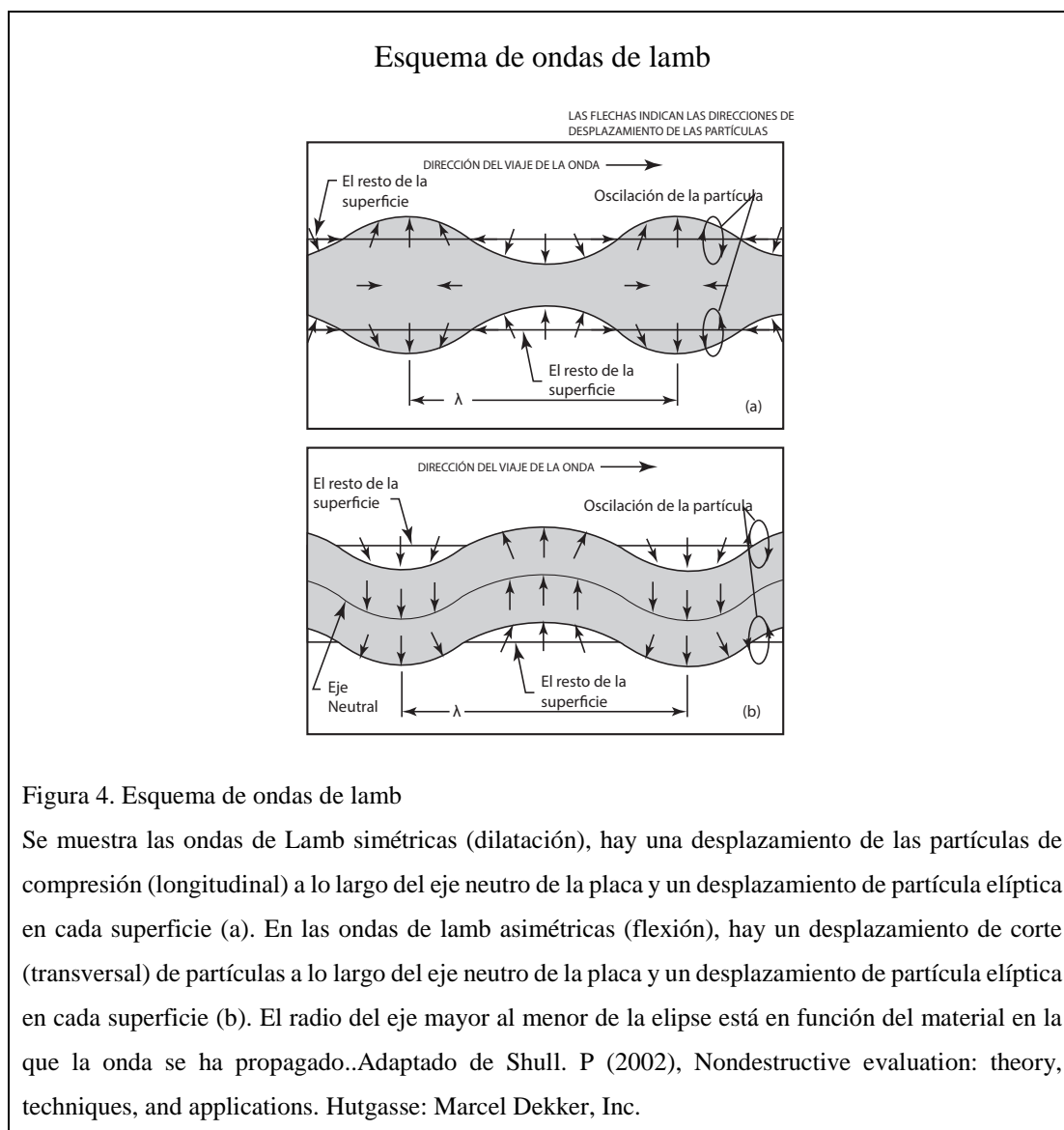
Son conocidas como ondas de placas, son otro tipo de onda ultrasónica utilizada en la inspección no destructiva de materiales. Estas ondas se propagan en placas de espesor menor a una longitud de onda. Una onda Lamb consiste en una vibración compleja que se produce en todo el espesor del material, las características de propagación de ondas de Lamb dependen de la densidad, propiedades elásticas, y la estructura del material, así como el espesor de la pieza de prueba y la frecuencia. Su comportamiento se asemeja en general a la observada en la transmisión de ondas electromagnéticas a través de líneas de ondas.

Existen dos formas básicas de ondas de Lamb:

- Simétrico o asimétrico (Figura 4a)



-Dilatación, o flexión (Figura 4b)



## 2.4 Propiedades de las ondas de sonido

### 2.4.1 Velocidad.

El sonido viaja a diferentes velocidades a través de diferentes materiales. Es cierto que el sonido viaja más rápido en líquidos que en gases y más rápido en los metales que en

líquidos. Sin embargo, también es cierto que el sonido viaja a diferentes velocidades en diferentes metales. Hay una velocidad distinta de sonido para cada material.

Los dos factores principales que afectan a la velocidad del sonido son la densidad y la elasticidad del material. La velocidad con la que el sonido se propaga a través de un material depende de la rapidez con que una molécula puede conseguir otra molécula consecutiva para tomar la vibración; en otras palabras, para transmitir el mensaje. Para conseguir el movimiento de la molécula consecutiva, tiene que superar la inercia de esa molécula.

Los materiales con un alto valor del módulo de elasticidad de Young tienen una alta velocidad del sonido, como es el caso del acero, a su vez cuanto mayor sea la densidad de un material, menor es la velocidad del sonido.

La velocidad de la onda longitudinal para un material dado puede calcularse a partir de la ecuación:

Ecuación. 6

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left( \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right)}$$

Donde:

$V_c$  = Velocidad longitudinal de la onda

$E$  = modulo de elasticidad de Young

$\rho$  = Densidad del material

$V$  = Radio de Poisson

Las ondas de corte se manifiestan en sólidos y no se desplazan a la misma velocidad que la onda longitudinal en un material dado, debido a que es el módulo de rigidez el que dicta la velocidad en lugar de módulo de Young, y el módulo de rigidez es menor

que el módulo de elasticidad. Esto significa que la velocidad de la onda de corte es siempre más lenta que la velocidad de onda longitudinal en un material. Como regla general, la velocidad de onda de corte es más o menos la mitad de la velocidad de la onda longitudinal. La velocidad de corte se puede calcular a partir

Ecuación. 7

$$v_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Donde

$V_t$  = velocidad de la onda transversal o de corte

$\mu$  = módulo de rigidez

$\rho$  = Densidad del material

Las ondas de superficie (Rayleigh) también tienen su propia velocidad en particular, que generalmente suele ser aproximadamente 90% de la velocidad de la onda de corte. Aunque la velocidad para cada uno de estos modos de propagación se puede calcular, se requiere un conocimiento preciso de todos los parámetros, y estos no son generalmente disponibles para el inspector de ultrasonido.

#### **2.4.2 Longitud de onda.**

A medida que las partículas están completando un ciclo de su vibración, la onda de sonido se está moviendo en la dirección de propagación de la velocidad del material, la onda de sonido se moverá una distancia determinada en función de la velocidad en el material. Para los gases con velocidades bajas, la distancia recorrida es pequeña

comparada con la distancia en metales, que tienen velocidades altas. La distancia requerida para completar un ciclo se llama la longitud de onda. (Hellier, 2003)

La longitud de onda viene dada por el símbolo  $\lambda$  (lambda) y por la frecuencia del sonido en el material, puede ser calculada de la ecuación

Ecuación. 8 
$$\lambda = \frac{V}{f}$$

Donde:

$\lambda$  = longitud de onda

V = velocidad

f = frecuencia

### 2.4.3 Reflexión

El límite que existe entre un medio y otro (aire y acero), se le conoce como *interfaz*. En una interfaz, el sonido se puede transmitir de un medio a otro, sin embargo aquello que no se transmite puede ser reflejado al primer medio. Para el caso del acero y el aire, casi toda la energía se transmite dentro del acero y muy poco retorna al aire. Las proporciones que se refleja o se transmiten dependen de las propiedades de los materiales a cada lado de la interfase, estas propiedades tienen que ver con la densidad y elasticidad, y estos son los factores que deciden la cantidad de energía reflejada y transmitida en la interfaz. A cada material se le da un factor que se utiliza para calcular la reflectividad en una interfaz. Este factor se llama la "impedancia acústica" y viene dado por el símbolo Z. La impedancia acústica es el producto de la densidad y la velocidad del material, se lo expresa por la ecuación:

Ecuación. 9 
$$Z = \rho \times V$$

Donde

$Z$  = impedancia acústica

$\rho$  = densidad del material

$V$  = velocidad del material

Para calcular el porcentaje de energía reflejada para una interfase entre dos materiales, se usa la siguiente formula:

$$Energía\ reflejada = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \times 100\%$$

Donde  $Z_1$  y  $Z_2$  corresponden a las impedancias de cada uno de los materiales que se relacionen en la interfase.

#### **2.4.4 Acoplante.**

Si un transductor se coloca sobre el metal a inspeccionar, entre el transductor y el metal existirá un espacio de aire, creando un 100% de reflexión, por lo tanto el sonido no podrá viajar a través del metal y no habrá transmisión, para evitar este problema se coloca sobre el metal un líquido, grasa o pasta, llamada genéricamente acoplante. Esta sustancia no genera ninguna reacción química entre el acoplador y el metal. La mayoría de los acoplantes permiten entre 10 y 15% de transmisión del sonido, los acoplantes más utilizados son: agua, kerosenes, aceite, grasa, glicerina y carboximetil celulosa.

#### **2.4.5 Refracción en modo conversión**

Cuando el sonido se introduce formando un ángulo con respecto a la superficie se conoce como ángulo de incidencia, en la Figura 5 se muestra un haz de sonido que se desplaza hacia una interfaz en un ángulo de incidencia  $\alpha$  a la perpendicular que se le

conoce como línea normal a la interfase acústica, la velocidad del sonido en el medio 1 es  $V_1$  y en el medio 2 es  $V_2$ . (Figura 5)

Asumamos que,  $V_1$  es más lento que  $V_2$ , siendo el medio 1 agua y el medio 2 acero, el haz se desplaza hacia la interfaz y se mueve a la misma velocidad hasta que la golpea, luego que traspasa la interfase y pasa al medio 2 se acelera, sin embargo el sonido que permanece en el medio 1 mantiene la velocidad anterior  $V_1$ , hasta que todo el haz pase al medio 2 y adquiera una nueva velocidad  $V_2$ . Durante esta transición el haz ultrasonico pasa de un medio a otro con diferente velocidad y además con un ángulo de incidencia que no sea normal con respecto a la interfase que separa los dos medios, se forma el ángulo de refracción

La ley de Snell permite conocer el nuevo ángulo si las dos velocidades ( $V_1, V_2$ ) y el ángulo de incidencia es conocido ( $\alpha$ ), a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación. 10 
$$\frac{\sin \alpha}{V_1} = \frac{\sin \theta}{V_2}$$

Donde:

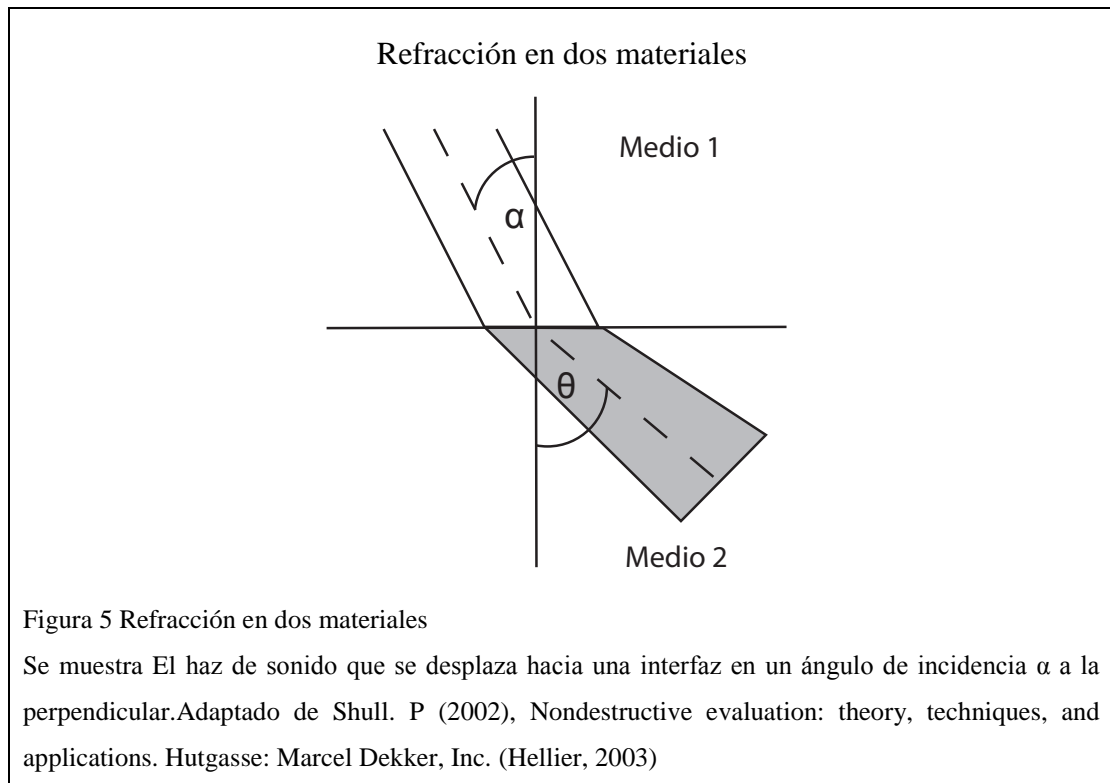
$\alpha$  = Ángulo entre la línea normal a la interfase acústica y la onda ultrasónica que incide en el medio 1

$\theta$  = Ángulo entre la línea normal a la interfase acústica y la onda ultrasónica refractada en el medio 2

$V_1$  = Velocidad de la onda en el medio 1

$V_2$  = Velocidad de la onda en el medio 2

La refracción se refiere a la porción de energía de sonido transmitida a la interfase, la proporción de energía reflejada es la misma que al principio de la transmisión, pero la energía reflejada sale de la interfase en un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia.



#### 2.4.6 Modo de Conversión

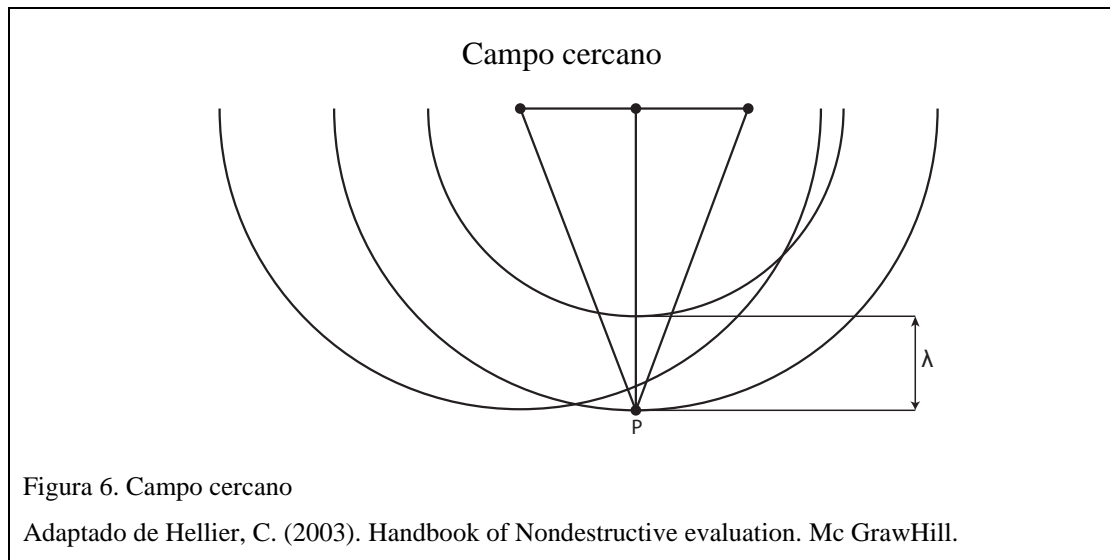
A medida que se introduce el haz de sonido con un ángulo de incidencia en un sólido, otro fenómeno comienza a surgir, llamado modo de conversión, esto es, el cambio de una onda longitudinal (haz incidente), en una onda de corte refractada cuando el sonido cruza la interfaz, además de la onda longitudinal refractada, formando así tres tipos de ondas.

#### **2.4.7 Características del haz**

Se ha podido inferir a partir de las ilustraciones y figuras que la propagación del haz de sonido se asemeja a un rayo, sin embargo, la realidad demuestra que la propagación es semejante a un haz. Dentro del haz, la intensidad o amplitud de la energía del sonido varía. El haz se divide en dos zonas distintas llamadas "campo cercano" y el "campo lejano" (ver Figura 8). En estos dos campos, diferentes mecanismos están trabajando para modificar la intensidad del sonido. La palabra usada para describir que tan efectiva es la pérdida gradual de la energía sonora se conoce como atenuación. La atenuación es el efecto combinado de una serie de parámetros: (Hellier, 2003)

- Interferencia y efectos de la difracción
- Interferencia de la absorción (fricción y calor)
- Dispersión de interferencia
- Interferencia de amplitud del haz





La distancia del campo cercano NF, puede ser calculado con la ecuación:

Ecuación 11. 
$$NF = \frac{D^2 \times f}{4 \times v}$$

Donde:

D = diametro del transductor

F = Frecuencia

V = Velocidad

#### - Absorción

El sonido se propaga a través de la vibración de las partículas de un sólido, líquido, o gas. El movimiento de las partículas causa fricción y absorbe parte de la energía. La velocidad a la que se absorbe la energía depende del material a través del cual está pasando el sonido y la frecuencia del sonido. En general, cuanto mayor sea la frecuencia, mayor es la absorción.

## - **Dispersión**

Las ondas sonoras se reflejan desde las interfaces dentro del material que está siendo probado, y los límites de grano en los sólidos son interfaces que pueden estar orientados aleatoriamente al haz. Esto causa que algunos de los sonidos se reflejen de manera aleatoria o dispersa. El material de grano muy fino provoca muy poca dispersión, pero el material de grano grueso provoca una dispersión considerable. La energía dispersa que no alcanza el transductor receptor está perdiendo energía. Esta energía que se encuentra dispersa crea pequeñas señales a través de la línea de tiempo, y se conoce como ruido y tiende a enmascarar las señales de discontinuidades. Tanto la absorción como la dispersión son fuentes de energía perdida, que se localizan en el campo cercano y el campo lejano. La Dispersión del haz de sonido es la causa de la pérdida de energía restante que afecta el campo lejano.

En el campo cercano, el haz se considera que es más o menos cilíndrico y tiene el mismo diámetro que el cristal transductor. Más allá del campo cercano, es decir el campo lejano, el haz se extiende como un cono. El ángulo del cono, como se muestra en la Figura 7, se puede calcular a partir de:

Ecuación 12. 
$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{1.22\lambda}{D}$$

Donde:

$\theta/2$  = Mitad del ángulo de la propagación del haz

$\lambda$  = Longitud de onda

D = Diametro del cristal transductor

La ecuación anterior incluye la constante de 1,22. Esto calcula el haz propagado hasta el límite absoluto del haz donde el sonido deja de existir. Esto no es muy práctico

porque si el sonido no existe, no puede detectarse o medirse. En la práctica, es más usual para reemplazar la constante de 1,22, ya sea con 0,56 o 1,08. El valor 0,56 predice los límites del haz donde el sonido se ha reducido a la mitad de la intensidad en el centro del haz. El valor 1.08 define los límites donde el sonido es una décima parte de la que esta en el centro del haz. Cabe recalcar que las constantes utilizadas anteriormente (0,56, 1,08, y 1,22) se utilizan comúnmente para el cálculo de las formas de haz teóricas. Si se requiere la forma del haz con fines de medición de discontinuidades, es más práctico para trazar la forma del haz utilizando un bloque de calibración conforme la normative lo indique.

En la práctica, es poco fiable usar la amplitud como un criterio de aceptación de los defectos detectados en el campo cercano. En algunas aplicaciones, este problema se supera mediante el uso de una línea de retardo (una columna de plexiglás) entre el transductor y la pieza de trabajo de manera que el campo cercano está contenida dentro de la línea de retardo

### Campos cercano y lejano de un haz ultrasónico

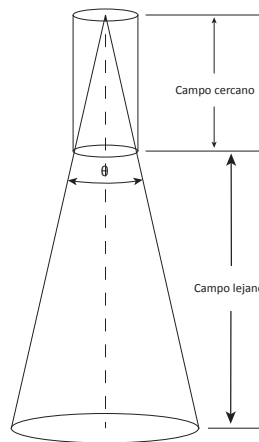


Figura 7. Campos cercano y lejano de un haz ultrasónico

Se muestra la forma del haz en general, incluyendo la parte del campo cercano. Adaptado de Hellier, C. (2003). Handbook of Nondestructiveevaluation. Mc GrawHill

### Representación del campo cercano y campo lejano

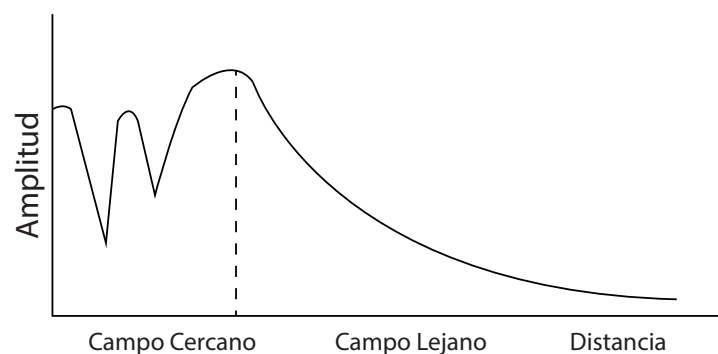


Figura 8. Representación del campo cercano y campo lejano

Se muestra la forma en que la amplitud cambia a lo largo del centro del haz. En el campo cercano, hay fluctuaciones en la amplitud debido a los efectos de interferencia. La última amplitud máxima marca el final del campo cercano y el comienzo del campo lejano, conocido como el punto  $Y_0$ . En el campo lejano, la intensidad puede decaer exponencialmente la forma del haz en general, incluyendo la parte del campo cercano. Adaptado de Hellier, C. (2003). Handbook of Nondestructiveevaluation. Mc GrawHill

## **CAPÍTULO 3**

### **ULTRASONIDO: TÉCNICA DIFRACCIÓN POR TIEMPO DE VUELO**

#### **3.1 Desarrollo histórico de la técnica: difracción por tiempo de vuelo**

##### **3.1.1 Ensayo ultrasónico convencional**

Los ensayos de ultrasonido convencional utilizan la técnica pulso-eco, para ello se utiliza un transductor piezoeléctrico, que a menudo tiene un elemento activo piezoeléctrico rectangular que dispara un pulso ultrasónico de corta duración mediante un haz en el metal y los ecos que vuelven son recibidos con el mismo transductor. El ancho del haz finito es el resultado de un elemento de cristal piezoeléctrico de tamaño finito. Los ecos ultrasónicos normalmente se muestran en un osciloscopio modificado, llamado detector de fallas, en el cual se muestra la forma de onda rectificada utilizando una base de tiempo que comienza en el pulso de disparo y se encuentra calibrado horizontalmente en términos de distancia dentro del metal.

El Sistema es calibrado verticalmente mediante el ajuste de la ganancia del amplificador, de modo que la señal esta basada en una característica estándar, la cual se genera a partir de un bloque de calibración y se visualiza como una altura en la pantalla. La amplitud de otras señales se puede obtener mediante el ajuste de los controles de ganancia o atenuación calibrados para dar la misma altura de la pantalla. Esto establece un nivel de referencia, las señales más altas que el nivel de referencia deberán ser evualuadas como defectos y aquellas que tengan el nivel más pueden ser ignoradas. Cuando en la inspección se detectan discontinuidades se evalua el tamaño, o a su vez se identifica la señal de amplitud relativa dadas por el reflector al calibrar el

equipo, esta calibración se basa en bloques o patrones en los cuales existen agujeros que simulan defectos, ya sea de tamaño pequeño o grandes.

### **3.1.2 Inconvenientes con la técnica pulso - eco**

Estas técnicas se basan en el supuesto de que los ecos provienen de características planas para formar un ángulo adecuado, que da un reflejo especular de nuevo al transductor. Se debe tener claro que es muy poco probable que los defectos sean exactamente perpendiculares al haz que se requeriría para generar un reflejo especular. Afortunadamente, en los casos prácticos existe una cierta atenuación con respecto a la mala orientación de los defectos, puesto que la difracción hace que la reflexión de la energía se extienda sobre un ángulo más amplio, logrando que los defectos que no están bien identificados, produzcan una mayor dispersión angular. Así, hay más probabilidad de la detección de un defecto orientado al azar, y una gama de ángulos de haz se utiliza para asegurar que esto suceda. Sin embargo, los métodos de dimensionamiento de movimiento del palpador requieren un juicio que permita determinar si el rayo ha alcanzado el borde del defecto. El resultado neto es que la inspección minuciosa mediante la técnica de pulso-eco requiere el uso de palpadores enviando rayos en un rango de ángulos, dependiendo de la orientación de los defectos que se busca y requiere un examen muy cuidadoso de ecos, cuando el nivel de amplitud está muy por debajo se espera un defecto orientado favorablemente.

### **3.1.3 Las bases de la técnica difracción por tiempo de vuelo**

Una de las bases importantes para el desarrollo de la técnica Difracción por tiempo de vuelo se debió a que apunto a la búsqueda de ondas difractadas y evitar las ondas reflejadas, permitiendo así que los defectos no se oculten en las reflexiones especulares. Además, al momento de realizar las mediciones, estas se pueden hacer con una alta precisión, que se puede utilizar para dimensionar los defectos con exactitud.

Con el fin de optimizar la intensidad de la señal de difracción y para evitar las señales de reflexión especular, los palpadores se despliegan como se muestra en la Figura 9.

Una señal típica consiste en el primer pulso de una onda viajando por la ruta más directa, llamada la onda lateral, seguido por más pulsos de ondas difractadas de los defectos y finalmente una reflexión especular desde la pared de fondo del componente.

La onda lateral y el eco de fondo de la pared actúan como señales de referencia natural, que delimita la zona de tiempo dentro de la cual se puede esperar las señales que muestran defectos. Tenga en cuenta que los bordes superior e inferior del defecto dan señales de amplitud bastante similar pero, para cualquier señal individual, uno debe ser capaz de diferenciar la fase en la que se origina el defecto, desde la parte superior o inferior.

### Esquema de inspección utilizando la técnica TOFD

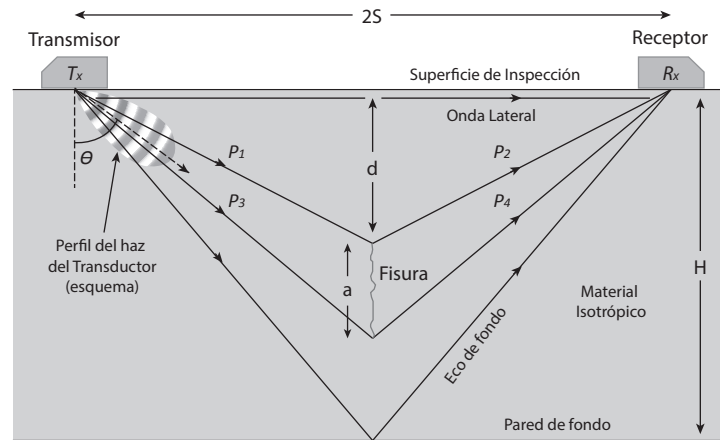


Figura 9. Esquema de inspección utilizando la técnica TOFD

Se muestran los dos palpadores básicos utilizados en la técnica Difracción por Tiempo de Vuelo. La ubicación de las puntas de la fisura son determinadas desde la diferencia de tiempos entre la onda lateral y los pulsos que siguen el camino de  $P_1 + P_2$  y de  $P_3 + P_4$  Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd.

La temporización de las señales difractadas, con relación a la onda lateral y el eco de fondo de la pared se pueden utilizar para calcular la profundidad de los bordes del defecto como se muestra en la parte superior de la Figura 9. Esto supone que el defecto se coloca simétricamente entre los palpadores, una posición que se encuentra al mover las palpadores (mientras se mantiene la separación constante) a lo largo de la línea que se unen entre sí hasta que el retardo de las señales difractadas se convierte en mínimo. La resolución de la profundidad se deteriora a medida que la superficie de inspección se aproxima, pero si es necesario la resolución de la profundidad se puede mantener cerca de la superficie moviendo las palpadores más cerca. La experiencia y la teoría de acuerdo con la predicción de una zona angular para una inspección precisa y fiable va desde unos  $45^\circ$  a  $80^\circ$  respecto a la normal de la superficie de la placa.



## **3.2 Bases teóricas de la difracción por tiempo de vuelo**

### **3.2.1 Difracción por tiempo de vuelo en medios isotrópicos**

#### **-Longitud y profundidad de las discontinuidades.**

Para calcular el tamaño y la profundidad de la discontinuidad a través de la superficie de inspección se utiliza el teorema de Pitágoras. Se supone que la discontinuidad está orientada en un plano perpendicular tanto a la superficie de inspección como a la línea que une el transmisor y el receptor a lo largo de la superficie de inspección.

Se supone también que la discontinuidad está a medio camino entre el transmisor y el receptor con el extremo más cercano a la superficie de inspección a una profundidad  $d$  por debajo de ésta, y la discontinuidad tiene una medida a través de la pared  $a$ .

### Representación de la señal de salida en el receptor

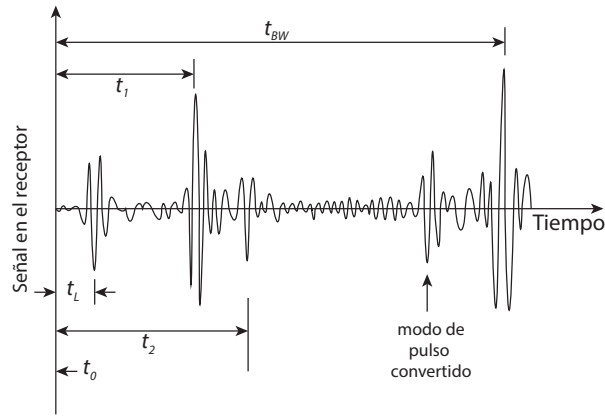


Figura 10. Representación de la señal de salida en el receptor

Se muestra la señal de los extremos de la fisura que son determinadas por  $t_1$  (camino de  $P_1 + P_2$ ) y  $t_2$  (camino de  $P_3 + P_4$ ) Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd.

Con referencia a la Figura 9, si la separación entre los centros del transmisor  $T_x$  y del receptor  $R_x$  se toma como  $2S$ , y la velocidad de propagación de las ondas elásticas se toma como  $C$ , entonces los tiempos de llegada de las diversas señales referenciados en la Figura 10 son:

Ecuación 13. 
$$t_L = \frac{2S}{C}$$

Ecuación 14. 
$$t_1 = \frac{2\sqrt{S^2 + d^2}}{C}$$

Ecuación 15. 
$$t_2 = \frac{2\sqrt{S^2 + (d+a)^2}}{C}$$

Ecuación 16. 
$$t_{bw} = \frac{2\sqrt{S^2 + H^2}}{C}$$

Donde:

$t_1, t_2$ : Son los tiempos de llegada de las señales difractadas de los extremos de la discontinuidad.

$t_L$ : Primera señal en llegar.

$T_{bw}$ : Señal de la onda lateral y del eco de fondo

$H$ : espesor de la placa

$C$  también puede ser  $C_p$  o  $C_s$ , la velocidad de propagación de la compresión de la masa u ondas de corte respectivamente.

La profundidad a la que se encuentra la parte superior de la discontinuidad  $d$  se puede calcular con:

Ecuación 17. 
$$d = \frac{1}{2} \sqrt{C^2 t_1^2 - 4S^2}$$

y la longitud de la fisura  $a$  está dado por:

Ecuación 18. 
$$a = \frac{1}{2} \sqrt{C^2 t_2^2 - 4S^2} - d$$

El valor de separación entre las zapatas no necesita ser conocido, ya que puede ser sustituido con:

Ecuación 19. 
$$2S = C_L t_L$$

Donde

$C_L$ : velocidad de la onda lateral.

En una placa plana la velocidad  $C_L$  es idéntica a la velocidad  $C_p$  o  $C_s$  de compresión o de corte respectivamente, sin embargo se utiliza las señales de ondas de compresión debido a su tiempo de llegada con respecto a las ondas cortantes, a su mejor resolución y principalmente que son de fácil interpretación.

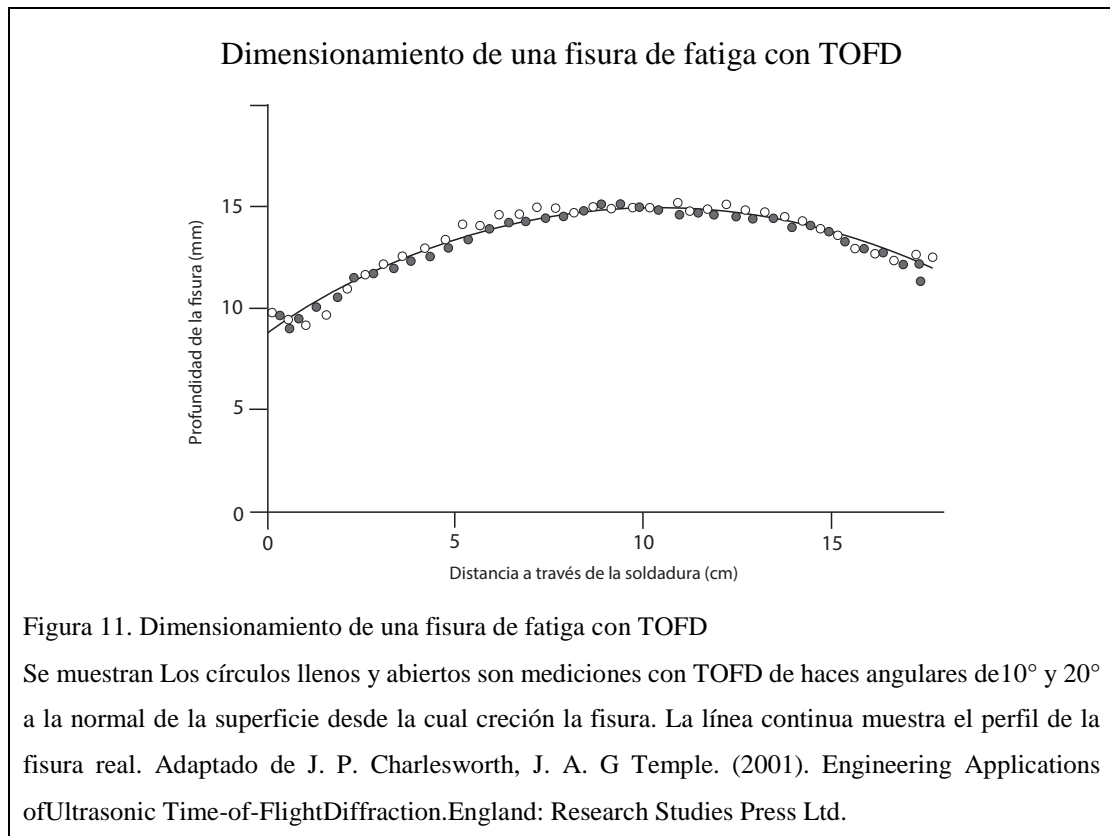
Al utilizar las señales que emiten las ondas de compresión, se elige la separación de la zapata de tal manera que cualquier señal que se desplace por su trayectoria completa como ondas de corte llegue después del eco de pared de la onda de compresión. Tomando la Figura 26, tenemos que:

$$t_L(corte) > t_{bw}(compresión)$$

$$\frac{2S}{C_s} > \frac{2\sqrt{S^2 + H^2}}{C_p}$$

#### **-Exactitud de las mediciones en espesores**

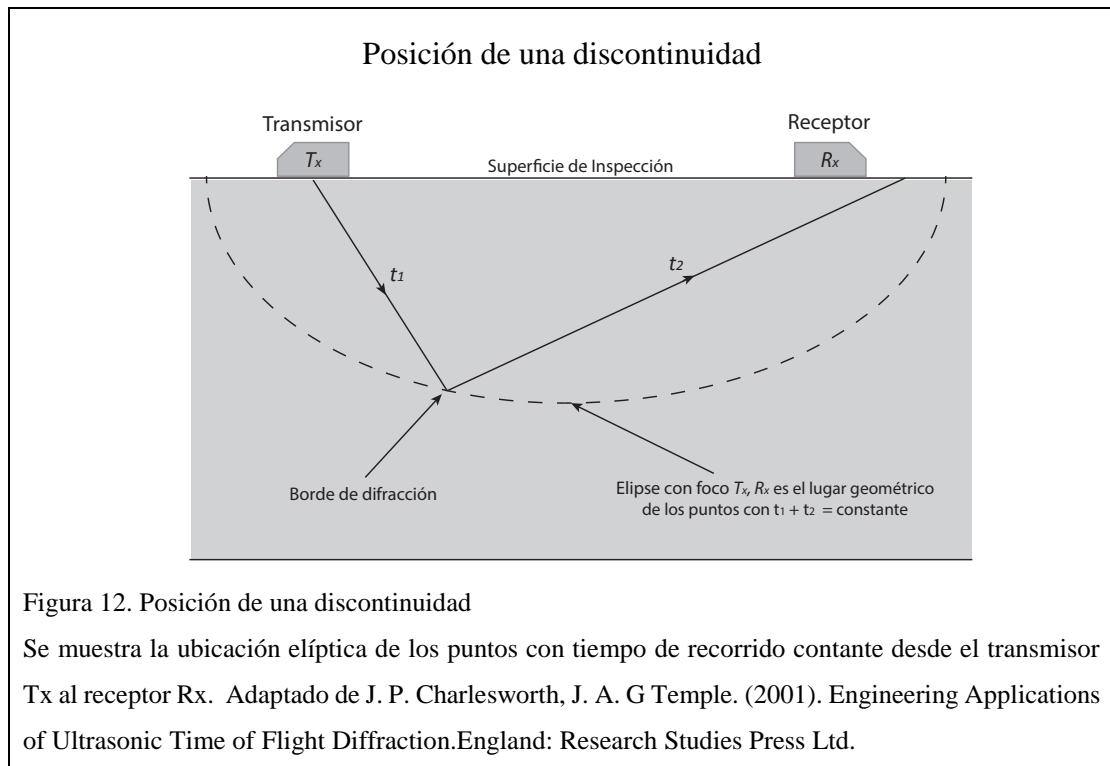
En la Figura 11 se muestra un ejemplo de la precisión alcanzable de la profundidad de un defecto, entre aproximadamente 8 y 15mm, donde las profundidades de defecto medidas se representan frente a las profundidades de defectos reales.



El defecto en este caso es una fisura por fatiga. En la Figura 11, el perfil real está dado por la línea continua, mientras que los valores experimentales son dados por los círculos. El error de la raíz media cuadrada (RMS) se encuentra en 0,3 mm.

### **-Punto del espesor o profundidad de una discontinuidad**

Para el análisis de la ubicación de la discontinuidad se ha considerado que se encuentra ubicada entre el transmisor y el receptor, pero esta no es la posición relativa más general de las zapatas y el defecto. En general, la discontinuidad se encontrará en algún lugar entre las dos zapatas como se indica en la Figura 9, pero no necesariamente a medio camino entre ellas. Las ubicaciones posibles de las puntas de las discontinuidades se encuentran en lugares de tiempo de recorrido constante, que son arcos de elipses con los centros de las dos palpadores como focos. Esto se muestra en la Figura 12.



A partir de esta figura, está claro que existe alguna ambigüedad en la profundidad real desde la superficie y la extensión de una discontinuidad dimensionada con sólo dos palpadores, aunque este error será relativamente pequeño si el defecto está cerca de la mitad se asume la derivación de las ecuaciones 30, entonces la ambigüedad se elimina.

### Ubicación elíptica de la punta de una fisura por diferencias de tiempo

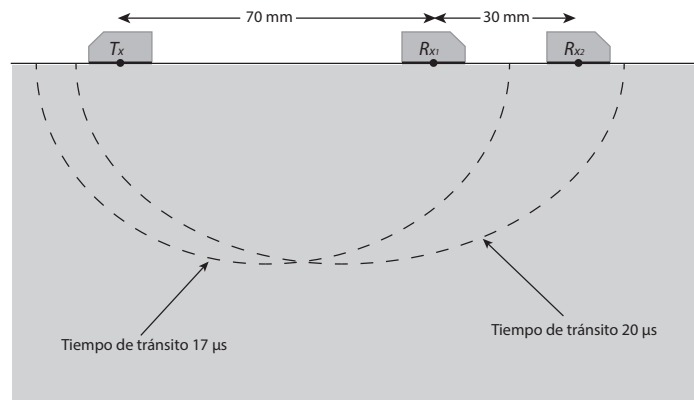


Figura 13. Ubicación elíptica de la punta de una fisura por diferencias de tiempo

Se muestran un transmisor y dos receptores; Dos transmisores y un receptor producirían un diagrama equivalente. La punta del defecto está en la intersección de las dos elipses. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd.

## 3.3 Amplitud de la señal y comparación con otras técnicas

### 3.3.1 Señales de Difracción por tiempo de vuelo para discontinuidades lisas y planas.

El modelo se basa en la Teoría Geométrica de la Difracción propugnada por (Keller, 1962), la cual determina que la energía de las ondas elásticas se propaga a lo largo de los rayos que se reflejan, refractan y transmiten a los límites entre los medios según las leyes habituales de las teorías de rayos familiares de la óptica. En los bordes de los límites (por ejemplo, en un borde de una discontinuidad) tiene lugar la difracción y esto también se puede tratar en la teoría de rayos con coeficientes de difracción que reemplazan los coeficientes de reflexión y transmisión.

### **-Haces angulares óptimos**

El haz angular incidente en el componente a inspeccionar puede lograr un balance entre las amplitudes de señal y la resolución de la profundidad permitiendo la optimización de la técnica.

En el equipo de exploración, las discontinuidades se encontraran entre el transmisor y receptor en algún momento de la exploración, siempre y cuando se limite a una región bien definida, sin embargo para que se logre una cobertura adecuada en regiones con gran profundidad o anchura, se utilizará varios pares transmisor-receptor.

Aunque la amplitud no se utiliza explícitamente para determinar la profundidad y la longitud de las discontinuidades, es importante tener amplitud suficiente para que las señales sean detectables por encima del nivel de ruido. Por lo tanto, es deseable utilizar la señal máxima, sujeto a cualquier restricción en la geometría de componentes.

Analizando la Figura 14 se muestra la variación en amplitud desde la parte superior e inferior de una discontinuidad similar a una banda localizada a mitad de camino entre dos transductores en función del haz angular de los transductores. A medida que este ángulo de haz se aproxima a  $90^\circ$ , los transductores se aproximan al infinito y la profundidad de las puntas de la discontinuidad de la superficie de inspección desaparece. A partir de la Figura 14, vemos que la amplitud muestra un máximo definido en torno a  $70^\circ$  en acero. En la misma figura, la resolución de la técnica para el ultrasonido de 5 MHz en acero, se representa como una línea discontinua, y aumenta bruscamente para un haz angular de aproximadamente  $75^\circ$  o mayor. Esto demuestra que los haces angulares de entre aproximadamente  $60^\circ$  y  $75^\circ$  producen buena resolución y una amplitud adecuada.



## Optimización de transductor de haz angular para TOFD en acero utilizando ondas de compresión

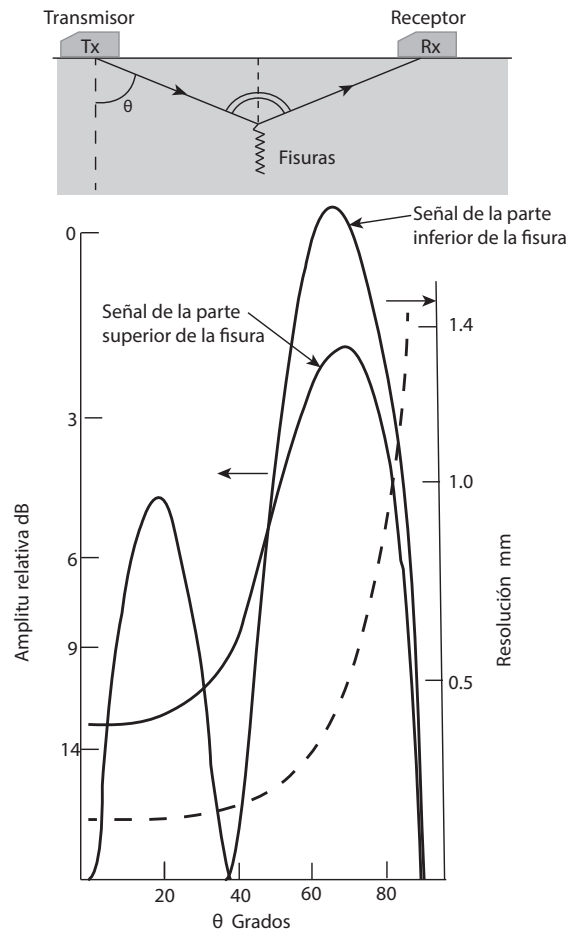


Figura 14. Optimización de transductor de haz angular para TOFD en acero utilizando ondas de compresión

Se muestran los efectos del haz angular en la resolución. En  $\theta = 90^\circ$  los transductores están infinitamente separados. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd.

A partir de los resultados de (Charlesworth J. P., 1984), se encontró que las ondas de corte tenían un ángulo óptimo, en acero, entre  $50^\circ$  y  $55^\circ$  para la parte superior e inferior de una discontinuidad plana vertical (Ogilvy & Temple, 1983).

Las medidas, con un goniómetro especialmente diseñado, de la amplitud de ondas de compresión difractadas en ondas de compresión han sido realizadas por (Golan, 1981), que encontraron que la amplitud alcanzó su punto máximo cuando el ángulo entre los haces incidentes y difractados se aproximaba a  $180^\circ$ .

### **3.3.2 Amplitudes de señal en comparación con las generadas por otras técnicas**

#### **-Los defectos**

El defecto más grave en un componente que se encuentre bajo tensión es una discontinuidad orientada perpendicularmente a la tensión principal. Muchas discontinuidades, por ejemplo la falta de fusión de soldadura y algunas fisuras por fatiga, son lisas en un sentido ultrasónico, lo cual quiere decir que las rugosidades son mucho menores que la longitud de onda ultrasónica. Una rugosidad media cuadrada inferior a  $\lambda / 20$  es ultrasónica lisa (es decir, produce dispersión difusa insignificante) mientras que una rugosidad mayor que  $\lambda / 5$  es muy rugosa (Ogilvy J. A., 1987). La rugosidad en las caras de ciertas grietas de fatiga está en una escala menor que  $\lambda / 20$  a frecuencias típicas de 2 a 5 MHz y, por tanto, apenas afecta a la señal ultrasónica del defecto.

#### **-Las señales de calibración**

Las señales de los defectos se comparan con las de un orificio de fondo plano de 3 mm de diámetro orientado hacia el máximo perfil del haz del transductor. La geometría de los dos cálculos de calibración se muestra esquemáticamente en la Figura 15. Las

amplitudes de pico se registran para las inspecciones utilizando la técnica pulso-eco y difracción por tiempo de vuelo en la Tabla 1.

En la Tabla 1, las amplitudes de señal están en decibelios con respecto a los de un agujero de fondo plano de 3 mm de diámetro a la misma profundidad por debajo de la superficie de inspección que el centro del defecto. Para la difracción por tiempo de vuelo, la superficie plana del reflector de calibración es paralela a la superficie de inspección y, para la de pulso-eco, la cara plana del reflector de calibración es normal a la línea central del haz del transductor. Las inspecciones realizadas con la técnica pulso-eco son ondas cortantes.

#### **-Resolución de señales difractadas en pulso-eco**

Para el funcionamiento de impulsos cortos, las amplitudes de señal en la Tabla 1 se consideran como las apropiadas para el espectro de frecuencia en la que hay una amplitud máxima. Los cálculos aquí presentados para la inspección con la técnica pulso-eco para discontinuidades circulares o continuas son para señales que retornan al transductor en ángulos alejados a la reflexión especular en el defecto, porque las trayectorias de rayos desde el transmisor a los extremos de defecto difieren en más de 2 longitudes de onda, las señales observadas se resolverán en el tiempo y, por lo tanto, no sufrirán interferencias.

## Geometría de los reflectores de calibración para la técnica pulso-eco y TOFD

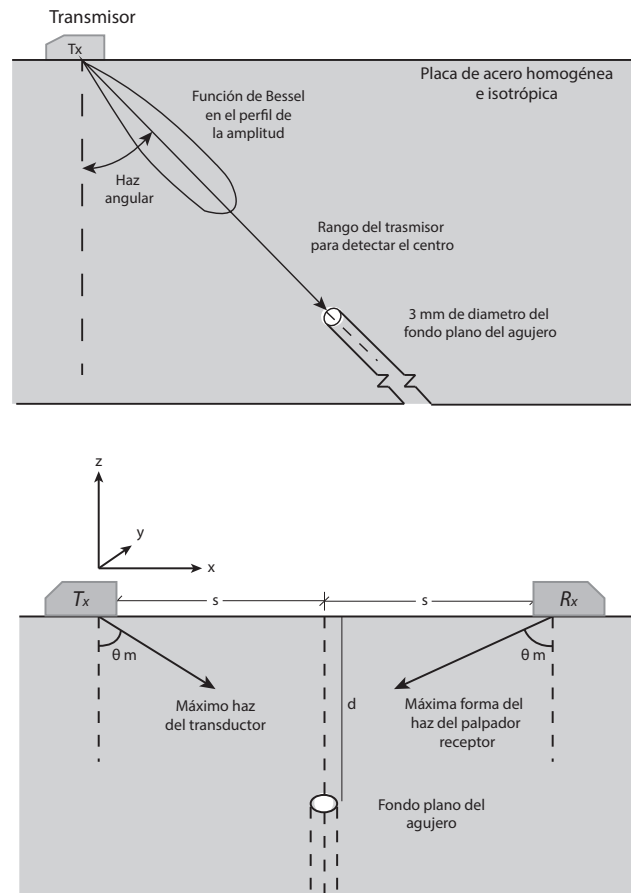


Figura 15. Geometría de los reflectores de calibración para la técnica pulso-eco y TOFD

Se muestra la geometría que utiliza la técnica pulso-eco y TOFD para identificar una discontinuidad en el material. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd

Tabla 1. Amplitudes previstas para las técnicas pulso eco y TOFD

<i>Descripción defecto</i>	<i>del</i>	<i>Técnica</i>	<i>Haz angular</i>	<i>Previsto</i>	
				<i>Señal superior</i>	<i>Amplitud inferior</i>
Ondulación 25 mm profundidad	vertical	5 MHz TOFD	60°	-18	-22
		2 MHz PE	45°	-19	-11
		2 MHz PE	60°	-13	-3
		2 MHz PE	70°	-6	-1
Fisura circular 25 mm profundidad		5 MHz TOFD	60°	-25	-27
		2 MHz PE	45°	-28	-19
		2 MHz PE	60°	-20	-10
		2 MHz PE	70°	-14	-8
Fisura circular 25 mm profundidad e inclinado 7°		5 MHz TOFD	60°	-27	-30
		2 MHz PE	70°	-19	-11
Fisura circular 25 mm profundidad e inclinado 7°		5 MHz TOFD	60°	-27	-30
		2 MHz PE	70°	-7	-4

Nota: Comparación de las señales generadas en un orificio fondo plano de 3 mm orientado hacia el máximo perfil del haz del transductor Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd

### **-Inspección pulso-eco de fisuras circulares y onduladas**

Consideramos primero una fisura continua de 25 mm de extensión, situada en un plano normal a la superficie de inspección a una profundidad de 82 mm por debajo de la superficie de inspección e inspeccionada con 2 MHz y utilizando zapatas de onda de corte de 60°. La geometría se muestra en la Figura 16 junto con las amplitudes de la señal.

Al observar la Figura 16, se visualiza una señal que se ubica en la parte inferior del defecto. Se espera que la señal difractada en estos dos casos tenga un lóbulo pequeño en un transductor para un rango de defectos de aproximadamente 140 mm. Esto está

marcado con A en la Figura 16. En este rango particular, para las zapatas de 60°, el haz desde el centro del transductor hasta la punta de la fisura la golpea en el ángulo crítico,  $\theta_c$  dado por la ley de Snell como:

Ecuación 20 
$$\theta_c = \sin^{-1} \left[ \frac{c_s}{c_p} \right]$$

Donde:

Cs: Velocidad de la onda de corte de la pieza de prueba

Cp: Velocidad de la onda de compresión de pieza de prueba.

Para el acero  $\theta_c$  es de aproximadamente 33°. Cuando  $\theta_c$  está por debajo del ángulo crítico, una onda de corte incidente es reflejada en componentes de compresión y de corte a diferentes ángulos, y cuando  $\theta_c$  está por encima del ángulo crítico, y la onda de corte reflejada todavía está presente, la onda de compresión no puede propagarse y se dice que es tenue.

Para un defecto circular de la misma extensión en la pared transversal, todas las señales se reducen de 8 a 10 dB con respecto a las de un defecto continuo.

La orientación vertical de los defectos anteriores está muy alejada de la orientación ideal para las inspecciones efectivas realizadas con la técnica pulso-eco. Idealmente, el defecto debería ser normal al haz de ultrasonidos para devolver una señal especular grande al transductor. Por lo tanto, los defectos verticales no son fáciles de detectar y al desarrollar la habilidad para detectar tales defectos da un cierto grado de confianza con respecto a otros defectos que se cree que son de orientación más favorable, los cuales se detectarán fácilmente.

Para los defectos que ocurren en la preparación de una soldadura en V, la orientación más probable será inclinada alejándose de la dirección vertical por un ángulo pequeño que corresponda al ángulo de preparación de la soldadura. Se simulará los resultados para una inspección utilizando la técnica pulso-eco con una zapata de  $70^\circ$  a un defecto inclinado. El defecto es una discontinuidad circular de 25 mm de diámetro y se inclina a  $7^\circ$  de la vertical. Las señales predichas para este defecto se muestran en la Figura 17 y la Figura 18, correspondientes al escaneo en las direcciones desfavorables y favorables con respecto al sentido de inclinación respectivamente. Las señales de pico de la orientación favorable son todavía sólo -4 dB en comparación con las de un agujero de fondo plano de 3 mm de diámetro. Para este defecto, la señal máxima de pulso-eco sería de aproximadamente 25 dB para un defecto inclinado de  $20^\circ$ , es decir, normal al haz de transductor para sondas de  $70^\circ$  y con el centro de haz dirigido al centro del defecto.

## Esquema de la aplicación de la técnica pulso eco para identificación de fisuras circulares y onduladas

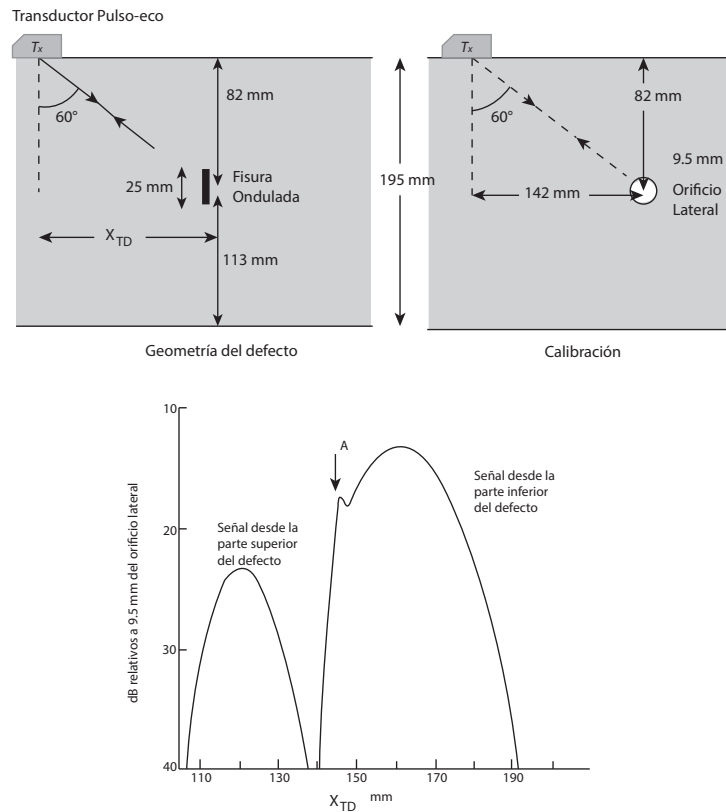


Figura 16. Esquema de la aplicación de la técnica pulso eco para identificación de fisuras circulares y onduladas

Se muestra la respuesta de la técnica pulso eco con 2 MHz y  $60^\circ$  de zapata de onda de corte para una fisura ondulada vertical de 25 mm de longitud localizada a 82 mm bajo la superficie de inspección. Resultados relativos al 100% DAC. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd

### 3.3.3 Señales de Difracción por tiempo de vuelo de discontinuidades circulares y onduladas

Para establecer comparaciones entre las señales de defectos típicos producidas por la técnica TOFD con las de la técnica pulso-eco se presentan resultados que son para



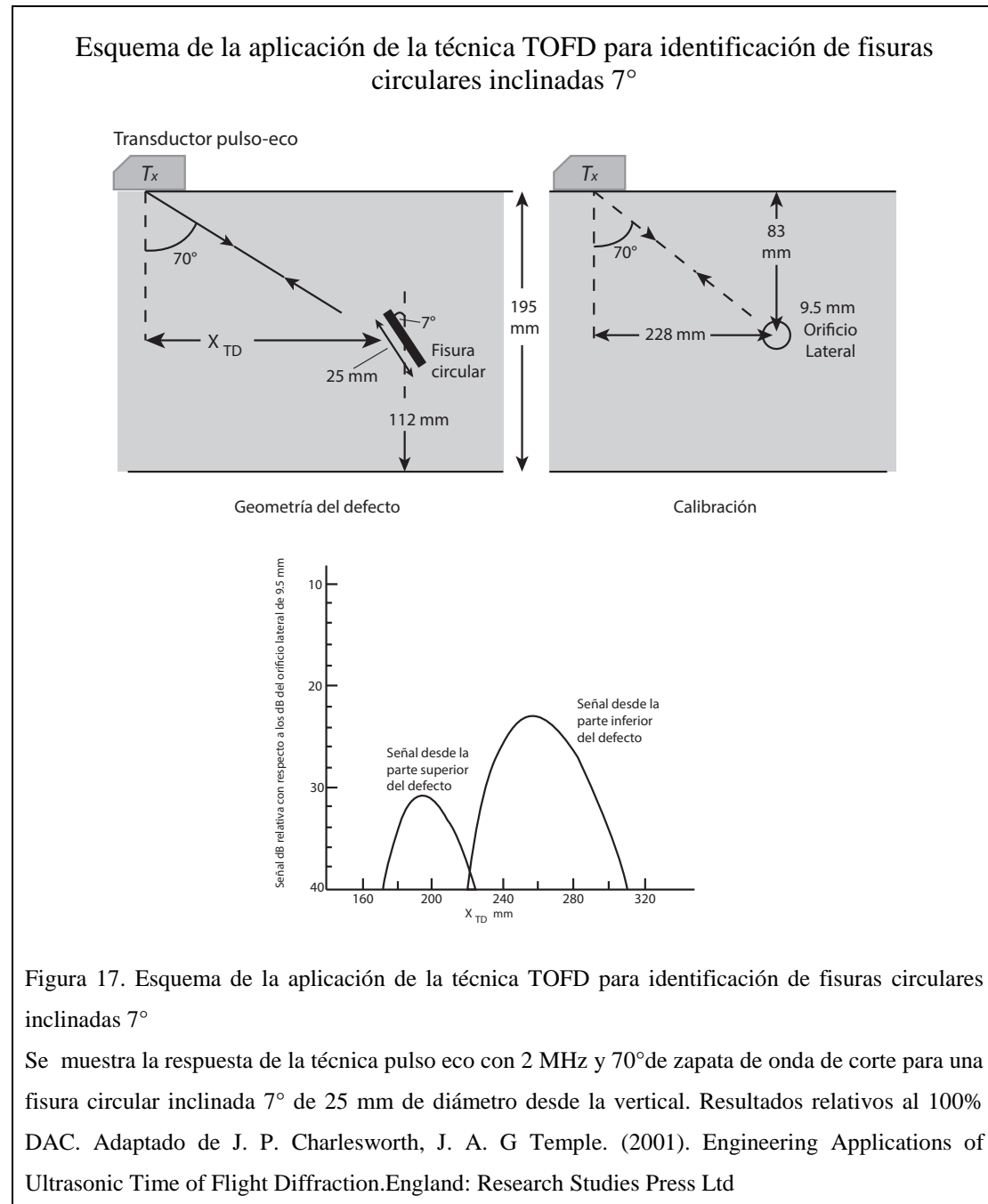
defectos similares, debido a las dificultades que representa la geometría entre las dos técnicas.

Los defectos escaneados utilizando la técnica pulso-eco producen una señal óptima tanto en la parte superior como en la inferior del defecto, por ello la profundidad del defecto es en gran medida irrelevante, sin embargo para la técnica TOFD, los palpadores suelen estar optimizados para una profundidad de defecto particular, por lo tanto se ha asumido que las líneas centrales del haz de los transductores del transmisor y del receptor se cruzan a una profundidad igual al centro del defecto.

El reflector de calibración es un orificio de fondo plano de 3 mm de diámetro taladrado verticalmente desde la parte inferior de la placa de manera que la superficie de extremo plana esté a la profundidad del centro del defecto. La superficie plana del reflector de calibración está situada a medio camino entre los centros de transductores del transmisor y del receptor, dando así una reflexión especular ideal para la señal de calibración.

Los transductores utilizados son palpadores de ondas de compresión que generan ultrasonidos de 5 MHz con un ángulo de  $60^\circ$  (haz máximo) con la superficie normal a la superficie de inspección. Los palpadores tienen un diámetro de 25 mm. Las amplitudes de difracción de tiempo de vuelo se dan para la comparación en la Tabla 1. A partir de estos resultados, se concluye que las amplitudes de señal relativas de la técnica TOFD tienden a ser del mismo orden de magnitud que las de un reflector mal orientado en las inspecciones utilizando la técnica pulso-eco, es decir, comparables a las de un palpador de  $45^\circ$  de un defecto vertical, pero son menores que los de los palpadores de  $60^\circ$  o  $70^\circ$ . Para las inspecciones que se realiza utilizando la técnica pulso-

eco, la intensidad de señal añadida de los palpadores de ángulo más alto es la razón de su inclusión en procedimientos de inspección.



## Esquema de la aplicación de la técnica TOFD para identificación de fisuras circulares inclinadas $7^\circ$

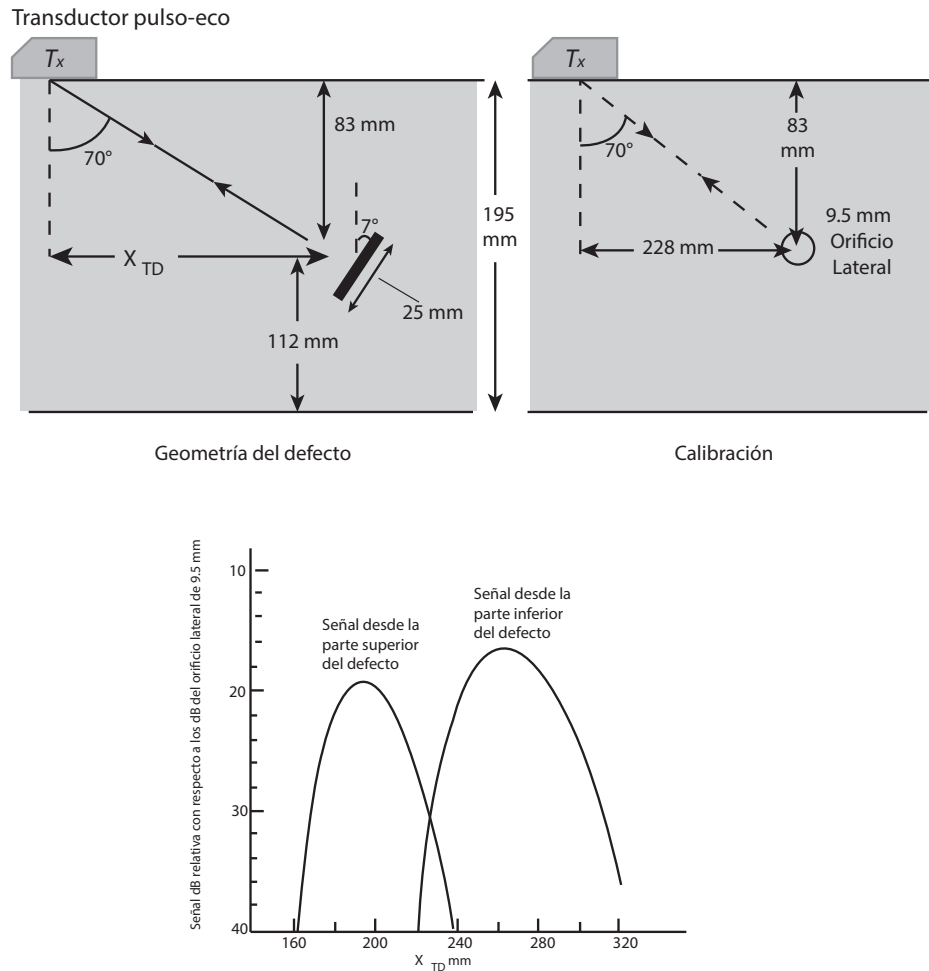


Figura 18. Esquema de la aplicación de la técnica TOFD para identificación de fisuras circulares inclinadas  $7^\circ$

Se Muestra la respuesta de la técnica pulso eco con 2 MHz y  $70^\circ$  de zapata de onda de corte para una fisura circular inclinada  $-7^\circ$  de 25 mm de diámetro desde la vertical. Resultados relativos al 100% DAC. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd

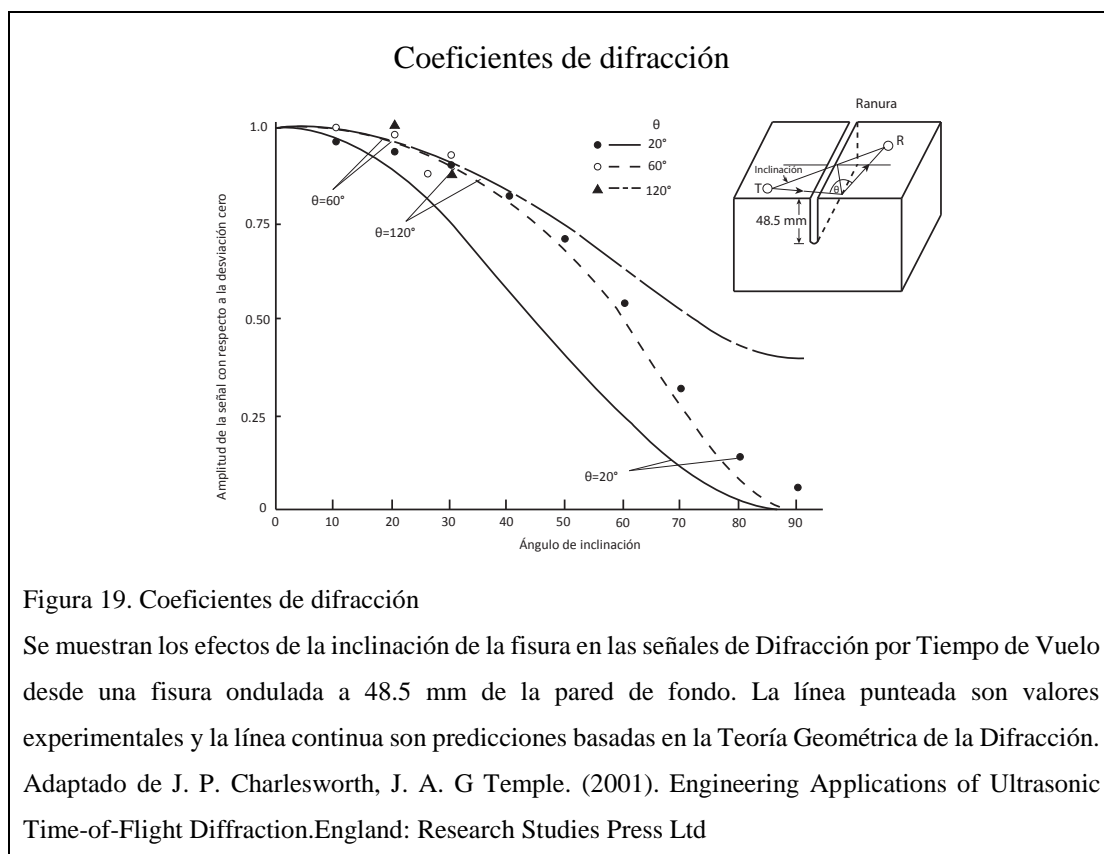
### **3.3.4 Señales de difracción de tiempo de vuelo de discontinuidades planas e inclinadas**

Para los defectos que no se encuentran en un eje perpendicular a la línea que une el transmisor y el receptor, o para defectos que no se encuentran inmediatamente debajo de la línea de exploración de los pares de transductores, la predicción de la respuesta ultrasónica es más difícil. El problema se convierte en intrínsecamente tridimensional y se requieren los coeficientes de difracción tridimensional. Estos han sido calculados por (Achenbach, Gautesen, & McMaken, 1982) y, en un formato diferente, por (Ramsdale, 1983), en este trabajo no profundizaremos en las ecuaciones que describen el comportamiento del modelo en tres dimensiones, sin embargo el funcionamiento es consecuente al modelo señalado en la sección 3.1.1.

En el caso de que un defecto ondulado permanezca en el mismo plano, es decir, que se encuentre en un plano normal a la superficie de inspección, pero que esté inclinada respecto a esa normalidad, se ha calculado el nivel de señal como una función del ángulo de inclinación entre  $20^\circ$  y  $65^\circ$ . Los ángulos de inclinación de hasta  $60^\circ$  tienen muy poco efecto sobre la fuerza de la señal de difracción de tiempo de vuelo. Cuando la inclinación se aproxima a  $90^\circ$ , la señal desde el borde inferior cae a cero, mientras que la del borde superior permanece finita. Sin embargo, en esta orientación el resultado se ve afectado por la suposición de una longitud de defecto infinita.

Una comparación experimental con estos resultados se llevó a cabo utilizando una placa con una ranura cortada atravesando a todo lo ancho de la placa y que penetraba verticalmente a la mitad del grosor de la placa. La rendija era de 0,4 mm de ancho con una punta semicircular. Se encontró que la amplitud de la señal de difracción de tiempo

de vuelo disminuyó sólo 1 dB para ángulos de inclinación de hasta 30°. Una comparación de estos resultados con las predicciones teóricas ha sido dada por (Stringfellow & Temple, 1987) y los resultados se muestran en la Figura. 39, los coeficientes de difracción utilizados en los cálculos son de (Achenbach, 1982).



### 3.4 Procesamiento, Visualización y análisis de los datos de Tiempo de vuelo

#### 3.4.1 Formas sencillas de visualización

Las señales TOFD no se muestran rectificadas, debido a que la fase de la señal difractada contine información sobre la posición y la orientación del borde desde la cual está siendo inspeccionada.

La base de tiempo en un equipo detector de fallas utilizando la técnica pulso-eco se calibra en términos de rango que es proporcional al tiempo de vuelo, y la combinación

del ángulo del palpador con el rango proporciona una estimación de la ubicación del defecto, sin embargo para los dos palpadores utilizados en la técnica TOFD, la información de la profundidad está relacionada con las diferencias de tiempo entre las señales de una manera no lineal, por lo que una presentación con estas características no es muy útil, por ello los equipos detectores de defectos convencionales no son adecuados para la aplicación de la técnica TOFD llevando de esta manera a desarrollar otro tipos de equipos.

Uno de las primeras pantallas para visualizar datos fue un osciloscopio modificado de tal manera que tenía una instalación de rastreo retardada con un ajuste de retardo calibrado para visualizar una porción de señal que sea de interés, esta pantalla es adecuada para mediciones manuales en material ultrasónico limpio, sin embargo cuando el material ultrasónico es menos limpio las señales en scan-A del material son difíciles de discernir.

### **3.4.2 Análisis de datos scan-A**

El análisis de una sola exploración con scan-A es sencilla, siempre y cuando las diversas señales puedan ser fácilmente identificables, sin embargo una sola exploración con scan-A entrega datos restringidos, por ello es necesario realizar un análisis con scan-B o scan-D. El scan-B es muy útil para ayudar en la interpretación de datos, ya que el ojo humano es muy bueno para detectar correlaciones entre huellas adyacentes.

### **3.4.3 Reconocimiento de la señal**

Las señales que indican defectos son las únicas de interés producidas entre la onda lateral y el eco de la pared de fondo, sin embargo no siempre es así, en el caso de que el material a inspeccionar sea anisotrópico de grano grande o en materiales que contienen inclusiones u otras inhomogeneidades, se pueden confundir estas señales con señales de defecto, incluso cuando las señales de defecto son claras, la presencia de señales en modo de conversión no pueden ser excluidas porque puede haber restricciones físicas en la elección de la separación del palpador, cuando se da este caso se puede ayudar a reconocer un defecto con la visualización en scan-B o scan-D, permitiendo que los efectos de la propagación del haz generen una forma característica del defecto ayudando así a su reconocimiento.

#### **-Arcos de difracción**

La técnica TOFD se desarrolló inicialmente como una herramienta para dimensionar fisuras cuya ubicación ya era conocida, sin embargo se ha aplicado generalmente para detectar los defectos (Hellier, 2003). Esto se hace posible mediante el uso de la presentación del scan-B. La coherencia espacial en la imagen del scan-B toma la forma de arcos de señal generados cuando los transductores se acercan y retroceden del defecto. Con el defecto simétricamente entre el transmisor y el receptor, cruzando el plano que atraviesa tanto el transmisor como el receptor y normal a la superficie de inspección, el tiempo de tránsito del pulso es mínimo. A medida que los transductores se alejan de esta posición, a lo largo de una línea de exploración perpendicular al plano del defecto, el tiempo de tránsito aumentará.

Por lo tanto, si los transductores son escaneados desde un lado de la posición simétrica a la otra, el tiempo de tránsito de la señal difractada se reducirá a un mínimo y luego aumentará de nuevo formando un arco en la presentación del scan-B.

Para ilustrar algunas de las propiedades de estos arcos consideramos una situación simplificada en la que los transductores de transmisión y recepción se localizan sobre una superficie de placa plana y calculamos el tiempo de vuelo para un pulso dispersado por un pequeño poro esférico a una profundidad  $p$ . Este defecto es esencialmente un dispersor de puntos. Para calcular el efecto de escanear los transductores, es más fácil fijar el transmisor y el receptor y dejar que el defecto se mueva a lo largo de una línea paralela a la superficie de la placa. El tiempo de vuelo puede entonces obtenerse como una función de la distancia del defecto a lo largo de su dirección de exploración desde algún origen arbitrario. El origen de las coordenadas se sitúa en la superficie y fijamos el transmisor en  $(S, 0, 0)$  y el receptor en  $(S, 0, 0)$ . Sea la posición del defecto  $(x, y, -d)$ , entonces el tiempo de vuelo  $t$  viene dado por:

Ecuación 21. 
$$t = \frac{1}{c} \left[ \sqrt{((x + s)^2 + y^2 + d^2)} + \sqrt{((x - s)^2 + y^2 + d^2)} \right]$$

Donde  $C$  es la velocidad de señal apropiada. Esta ecuación es para una posición fija del poro pequeño. Si simulamos una exploración del transductor permitiendo que el defecto se mueva a lo largo de una trayectoria paralela a la superficie dada por una línea recta tal como:

Ecuación 22. 
$$y = mx + constante$$



Hay un caso especial, cuando los transductores exploran paralelamente al eje y con el defecto simétricamente colocado entre ellos (un scan-D). En este caso,  $x = 0$  y donde  $y$  da la posición de escaneo y  $k^2 \equiv S^2 + d^2$  es una constante.

Ecuación 23. 
$$\frac{c^2 t^2}{4k^2} - \frac{y^2}{k^2} = 1$$

La Ecuación 23 se conoce como la ecuación de una hipérbola,  $t$  está en un punto mínimo donde el punto de dispersión se encuentra en el plano definido por los dos ejes de haz y aumenta a medida que el punto se aleja de ese plano. De los argumentos físicos está claro que la señal del lugar geométrico, tendrá la misma forma general para todos los recorridos de escaneo en esta geometría simple. En particular, la señal del lugar geométrico para una escaneo paralelo al plano definido por los ejes de haz (scan-B) se verán muy parecidos a hipérbolas para defectos profundos, pero aparecerán cada vez más aplanados cerca del mínimo, a medida que se aproxima a la superficie (véase la Figura 21) .

La Figura 20 muestra esquemáticamente la geometría utilizada en el origen de estos arcos múltiples y muestra predicciones de su forma para palpadores de diámetro 15 mm, separadas por 150 mm, escaneando sobre un defecto puntual 50 mm por debajo de la superficie. Para una fisura, habría un patrón similar de arcos tanto para los bordes superior como inferior, siempre que la dimensión de la pared a través del defecto fuera mayor que la longitud del impulso, o mayor que aproximadamente  $2\lambda$ .

### Esquema del desplazamiento simétrico del par de palpadores

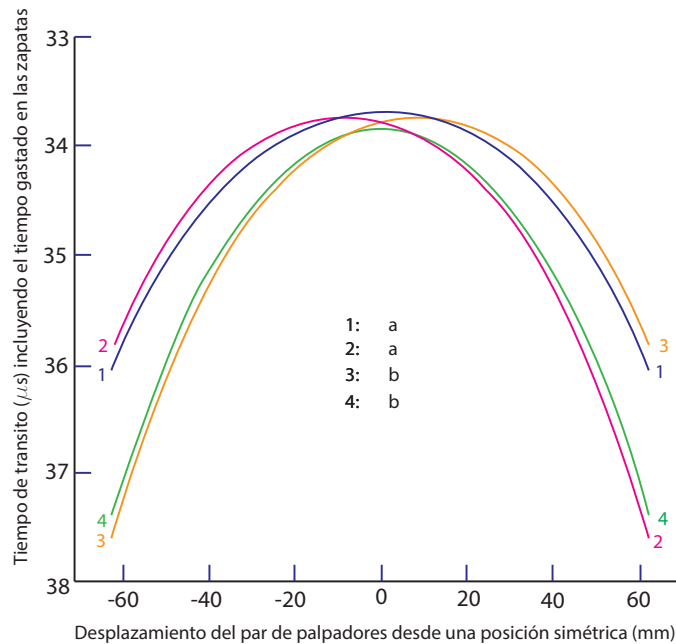
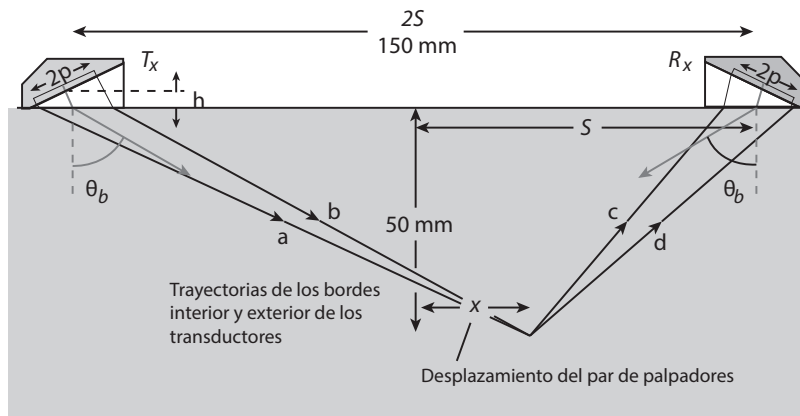


Figura 20 Esquema del desplazamiento simétrico del par de palpadores

Se muestran múltiples arcos producidos por los bordes internos y externos de los palpadores del transmisor y receptor. Los palpadores son de  $15 \text{ mm}$  de diámetro, tienen un haz angular de  $60^\circ$  y están separados por  $150 \text{ mm}$ ; La punta del defecto se sitúa a  $50 \text{ mm}$  por debajo de la superficie. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd.

En la geometría mostrada en la Figura 20 los palpadores están separados por  $2S$ , cada palpador es de diámetro  $2p$ , el defecto está a la profundidad  $z$ , y  $x$  indica la distancia

horizontal del defecto desde el plano a medio camino entre el transmisor y el receptor. Si se incluye en el análisis la geometría completa de las zapatas de los palpadores y la refracción de la Ley de Snell en la superficie de la pieza de trabajo, sólo se puede obtener una solución numérica y así se han calculado las curvas de la Figura 20, sin embargo, se puede obtener una solución aproximada utilizando una construcción debido a (Coffey & Chapman, 1983), en la que los palpadores y conjuntos de zapatas son reemplazados por palpadores virtuales de radio  $p = a (\cos\theta / \cos\psi)$ , donde  $a$  es el radio verdadero del palpador, mientras que  $\theta$  y  $\psi$  es el haz angular y el ángulo de la zapata respectivamente. Los palpadores virtuales están centradas en los “index point” en la superficie de la pieza de trabajo y alineadas de forma normal con los ejes del haz. Las trayectorias desde estos palpadores hasta los puntos en el interior de la pieza de trabajo se tratan como si estuvieran enteramente dentro del material de la pieza de trabajo.

Se define  $u = p\sin\theta$  y  $v = p\cos\theta$ . Con estos cambios el tiempo de recorrido se convierte en  $t_i$ , con  $i = 1,2,3,4$ , dado por:

Ecuación 24. 
$$t_i = \frac{1}{c} \sqrt{(S + \alpha_i v + x)^2 + (z - \alpha_i u)^2} + \frac{1}{c} \sqrt{(S + \beta_i v + x)^2 + (z - \beta_i u)^2}$$

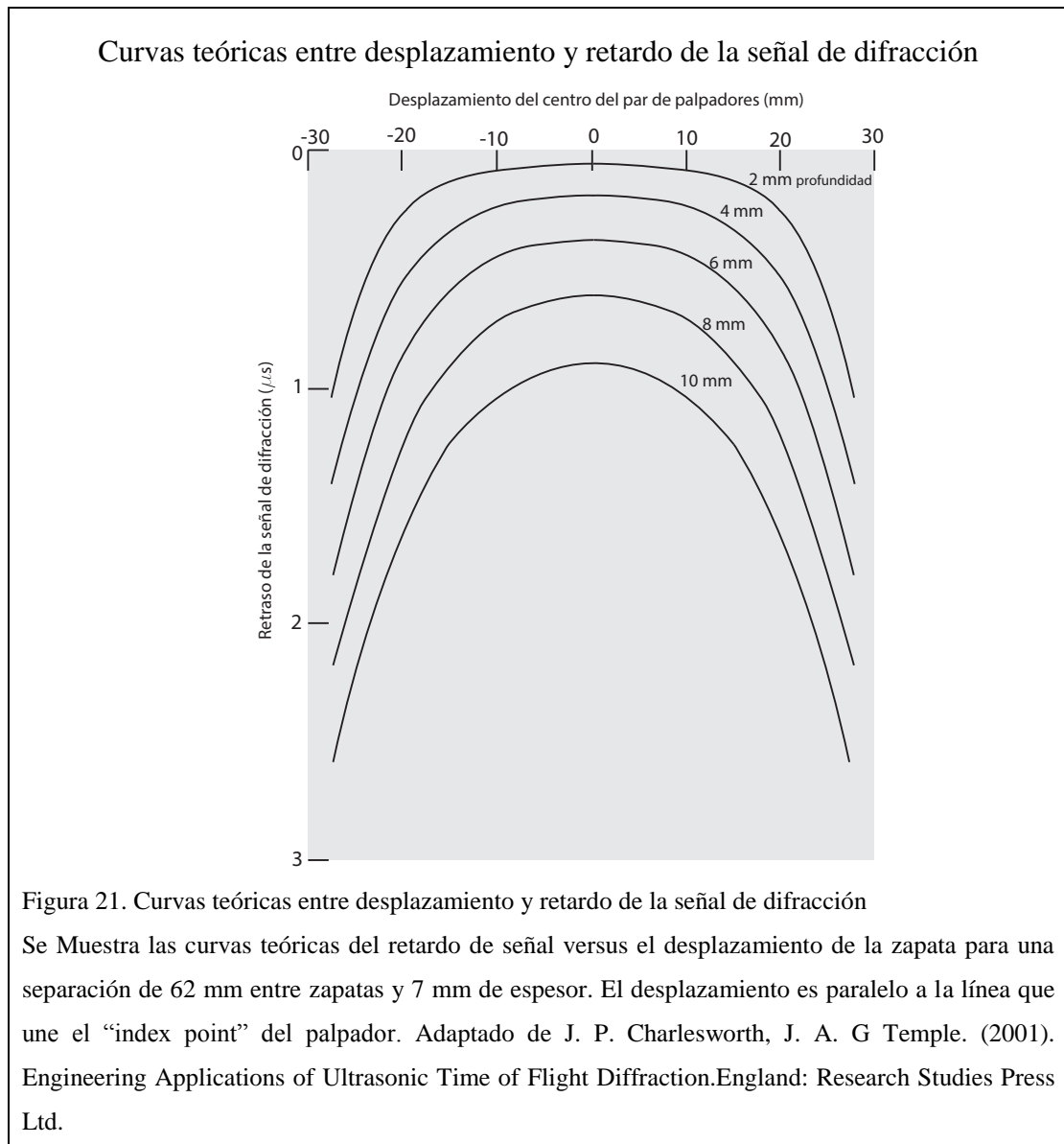
Donde los caminos están etiquetados de la siguiente manera:  $i = 1$  para los rayos  $a+d$ , en la Figure 2.13, con  $\alpha_i = \beta_i = +1$ ;  $i = 2$  para los rayos  $a+c$  with  $\alpha_i = +1$ ,  $\beta_i = -1$ ;  $i = 3$  para rayos  $b+d$  con  $\alpha_i = -1$ ,  $\beta_i = +1$ ; e  $i = 4$  para rayos  $b+c$  con  $\alpha_i = \beta_i = -1$ .  $\theta_b$  es el haz angular. Los arcos calculados a partir de estas fórmulas coinciden muy de cerca con los mostrados en la Figura 20.

Los arcos muestran las diferencias en el tiempo de recorrido a lo largo de los diferentes caminos, se debe considerar el efecto de la forma del pulso, estos generalmente viajan por trayectorias diferentes y se solapan e interferirán entre sí de manera que se modifique la forma del pulso recibido. Para el ejemplo se asume un pulso típico de 5MHz. En la Figura 20, los pares de arcos coinciden entre si en gran parte de su longitud, de modo que el efecto es dividir la señal en dos arcos, cada uno con una forma de pulso que difiere de la forma básica sólo con componentes de frecuencia. Sin embargo, cuando los cuatro arcos cruzan en el centro, los efectos son más severos. Aquí, la interferencia destructiva se produce en la frecuencia fundamental, dejando un pulso severamente distorsionado con un componente dominante de baja frecuencia.

#### **-Arcos y ajustes de curvas**

La manera en que el tiempo de vuelo de un defecto varía con la posición de un transductor durante un escaneo se visualiza mediante arcos característicos en la pantalla de datos, la cual permite mejorar la detección de defectos y la capacidad de dimensionamiento.

En la Figura 21 se muestra la forma de los arcos de difracción en función de la profundidad del punto de difracción para una separación entre palpadores de 62 mm y un espesor de 7 mm. El desplazamiento en este caso es paralelo a la línea que une los “index points” de los palpadores. Para desplazamientos perpendiculares a la línea los arcos son hipérbolas ampliándose a medida que aumenta la profundidad del defecto.



Cuando se extiende a todos los puntos en un borde continuo horizontal, las colas de las partes interiores del borde se anulan, de modo que la indicación resultante es horizontal sobre la longitud del borde.

En la pantalla digital se puede visualizar la comprobación del ajuste a cualquier indicación que genere sospechas de un defecto. En la Figura 22 se muestra una pantalla superpuesta.

Barrido TOFD utilizando el cursor.

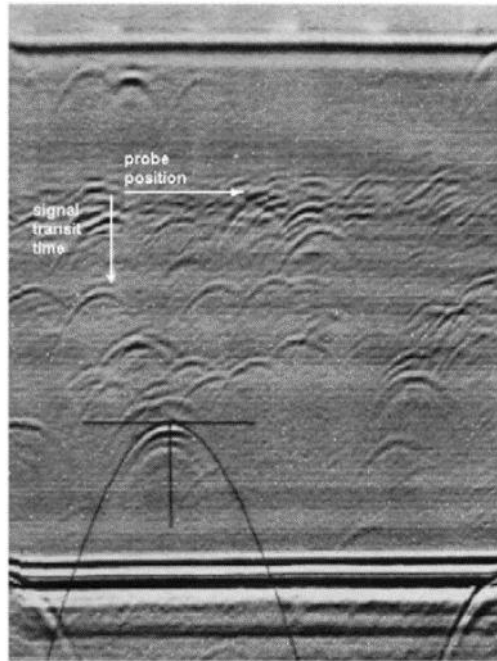
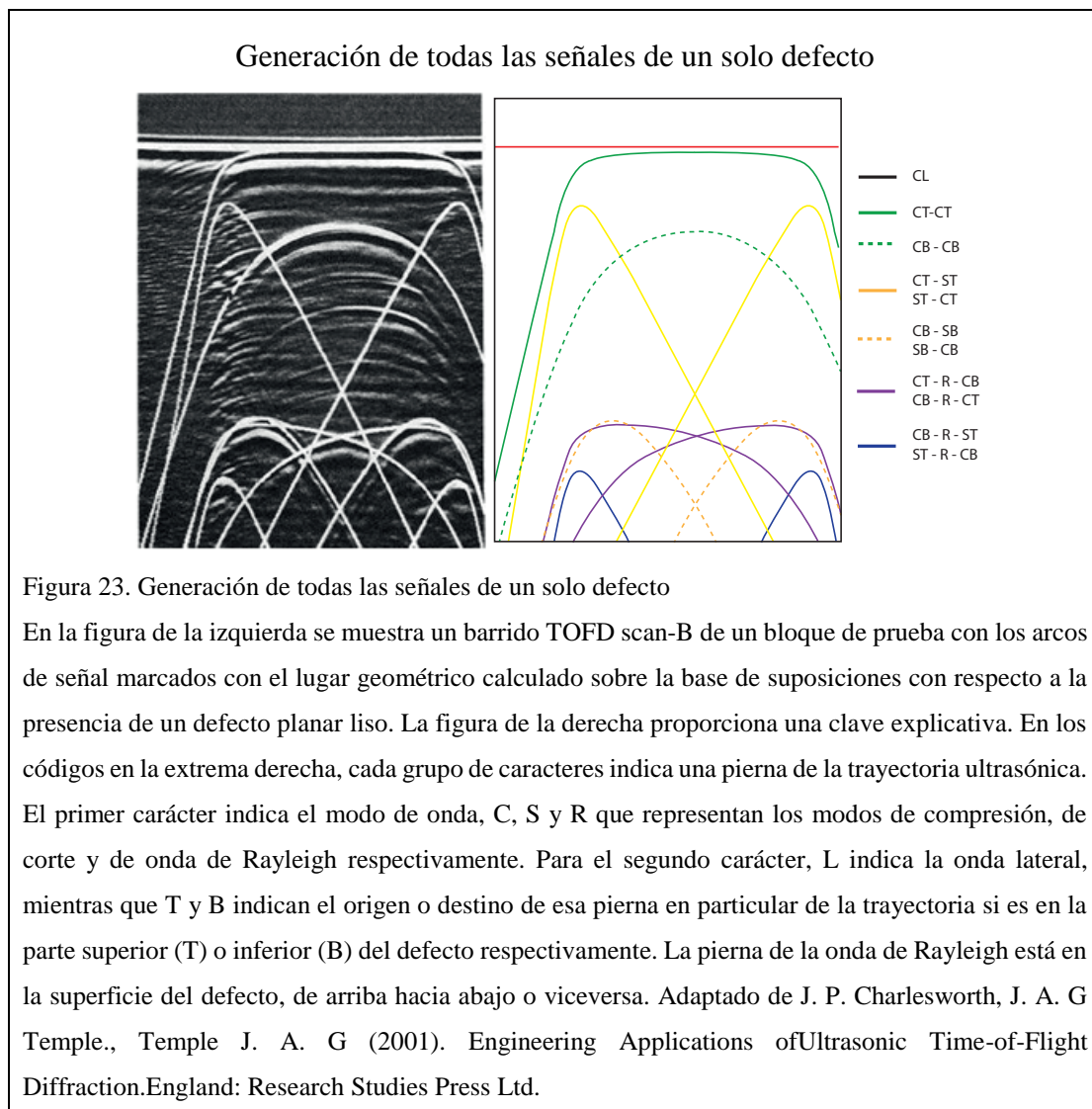


Figura 22. Barrido TOFD utilizando el cursor.

Se Muestra el cursor hiperbólico superpuesto sobre la señal apuntando un defecto. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple. (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction.England: Research Studies Press Ltd.

Cuando la visualización de las señales en la pantalla es muy compleja, puede ser necesario realizar un juicio sobre cuales son las señales de onda de compresión no convertidas desde la parte superior e inferior del defecto y luego calcular las posiciones y las curvas de todas las posibles señales en modo de conversión.

La hipótesis que indica la generación de todas las señales a partir de un solo defecto puede ser probada a fondo superponiendo el conjunto de curvas producido en la imagen scan-B, como se indica en el ejemplo de la Figura 23 utilizado en un patrón complejo de señales (Hellier, 2003).



### **-Uso del cursor para medir la longitud de defectos**

En la Figura 24 se muestra una simulación de defectos (Hawker y Burch 1999), mostrando pasos sucesivos en la medición del perfil de una fisura de superficie lejana mediante una cuidadosa adaptación del cursor contra la indicación de la señal. El punto a destacar aquí es que cuando la curva del cursor toca la curva de indicación de la señal, las pendientes deben coincidir.

Para todos estos puntos, se marca la posición del centro del cursor (siendo la posición del borde de difracción que produjo esa porción de la señal). El lugar geométrico de los puntos marcados, traza el perfil del borde de difracción y, si es completamente sensible, da una indicación exacta de toda la extensión del defecto. Otra técnica útil es la de ajustar el cursor a las colas del eco de fondo en cada extremo de la región donde está oscurecido. Esto permite estimar la longitud total de la fisura donde se abre a la superficie posterior.

El defecto utilizado en esta demostración fue tal que proporcionó una indicación de señal continua en toda su longitud y cada parte del borde de difracción contribuyó a la indicación. La mayoría de los defectos reales caería en esa categoría, pero es posible imaginar defectos «patológicos» que serían mucho más difíciles de perfilar.



### Medición del perfil de una fisura mediante el uso del cursor

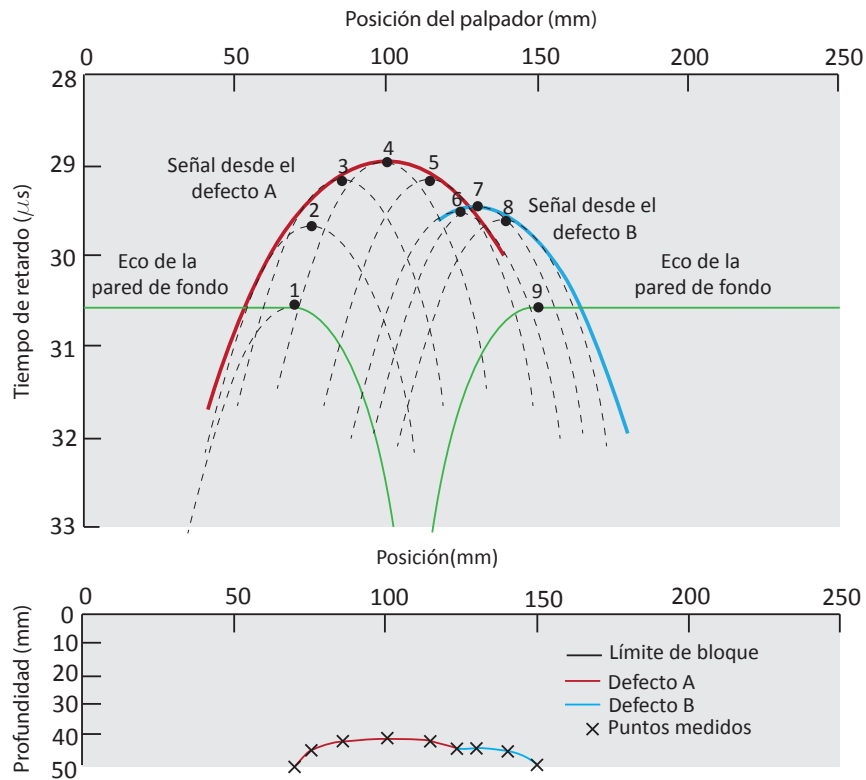
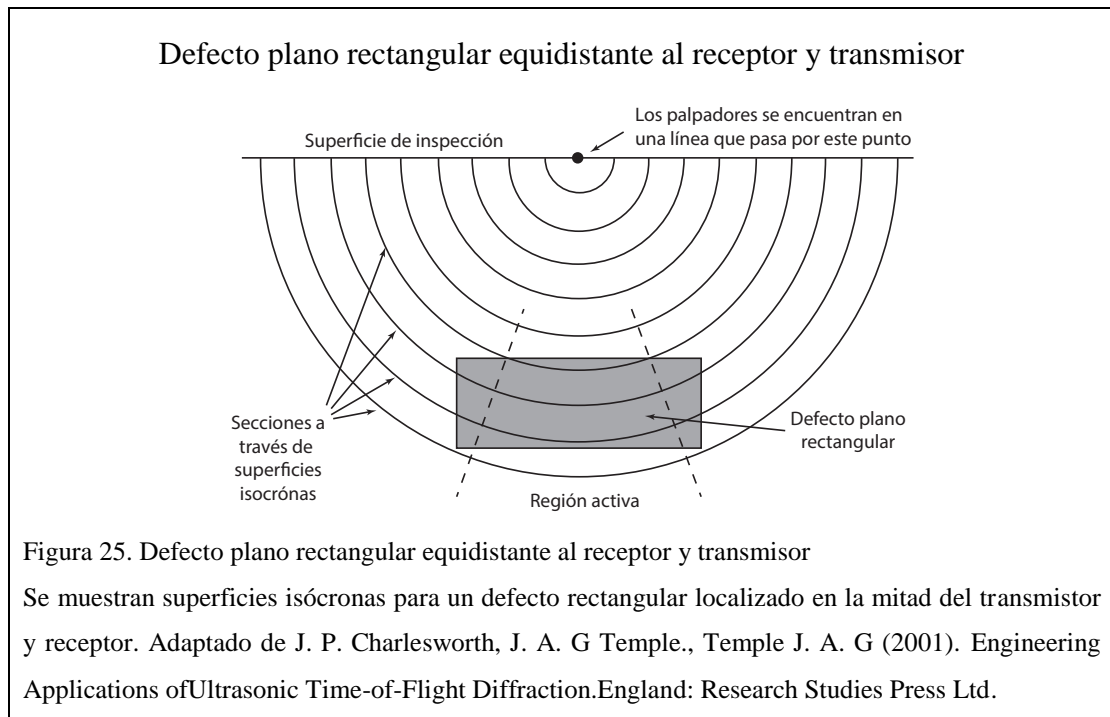


Figura 24. Medición del perfil de una fisura mediante el uso del cursor

Se muestra la derivación simulada de un perfil de defecto usando el cursor. La figura superior muestra las posiciones sucesivas del cursor hiperbólico utilizado en la derivación del perfil. En cada punto, el cursor toca una señal de defecto o eco de la pared posterior en un punto donde las pendientes coinciden. La figura inferior muestra la forma real del defecto en el bloque con los puntos medidos superpuestos.. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple., Temple J. A. G (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd.



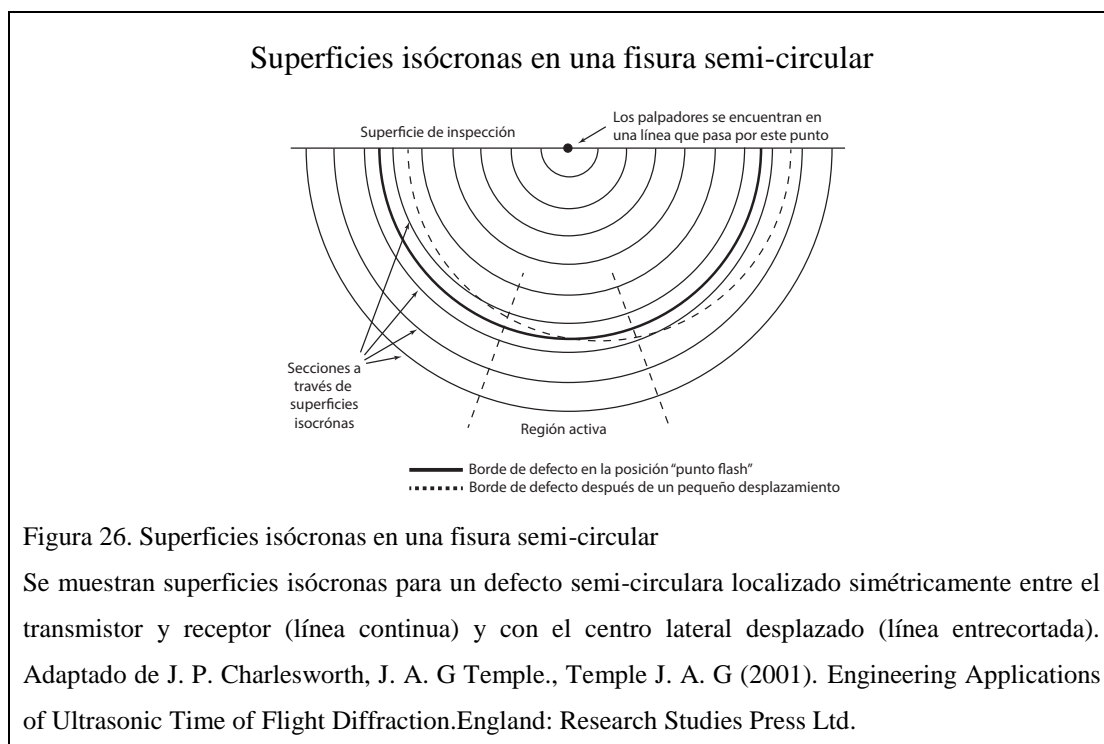
Una isócrona es un punto de tiempo integral correspondiente a un medio ciclo del tiempo de tránsito de un escaneo y se representa mediante elipsoides de revolución con los índices de los palpadores como foco. (Hellier, 2003).

Un defecto es representativo cuando las isócronas se encuentran dentro de los dos haces ultrasónicos generados por el receptor y el transmisor.

Se simula un defecto mostrado en la Figura 25, el cual se representa mediante un defecto plano rectangular, que se encuentra equidistante de los dos palpadores. Este plano corta las isócronas en un conjunto de círculos centrados en el punto de la superficie de inspección que se encuentra en la línea que une los palpadores. Si un largo defecto rectangular se encuentra directamente entre los palpadores y perpendicular a la línea que une los centros del palpador, sus bordes superior e inferior pasan a través de una región activa horizontal de la isocrona y, por lo tanto, producen señales fuertes,

normales a las isocronas, o están fuera de la región activa, produciendo así una señal resultante despreciable.

Si los palpadores escanean paralelamente al plano de defectos para acercarse y pasar por encima del defecto. Las señales superior e inferior permanecerán constantes durante la mayor parte de la longitud del defecto, al disminuir en 6 dB en los puntos donde los extremos del defecto están alineados con la línea central del haz mostrarán un ligero retraso adicional y esto aumentará, dando lugar a las curvas características de la señal, ya que el escaneo pasa más allá del defecto. Por lo tanto, para un defecto rectangular, la longitud de las señales superior e inferior en la imagen de barrido scan-D dará una buena indicación de las mediciones de longitud y longitud de defecto realizada con una disminución de 6 dB o con un ajuste de cursor.



En la Figura 26 se simula una fisura semicircular, para este caso, en la mayoría de las posiciones de escaneo el borde del defecto cruza varias isócronas y la señal será

destruida por la interferencia destructiva. Cuando el centro del semicírculo se encuentra en la línea que une los palpadores, el borde del defecto total se encuentra paralelo a una isocrona y se obtendrá una señal muy grande.

Se produce un brillo fuerte o un punto flash (ver Figura 27) en la posición simétrica y señales débiles o despreciables en otro lugar cuando una sección del borde inferior de un defecto se aproxima a una porción de un semicírculo centrado en la superficie de inspección. Los defectos típicos que muestran este efecto son las fisuras semi-elípticas que rompen la superficie, sin embargo, la longitud total de una fisura se puede estimar a partir de la distancia de escaneo sobre la que se bloquea la onda lateral. Para un defecto de forma elíptica, en una orientación arbitraria con respecto al transmisor y al receptor, hay hasta cuatro “flashpoints” en el borde del defecto, generalmente tres en el borde inferior y uno en el borde superior del defecto. La curvatura del borde provoca el enfoque de los rayos difractados.

Cuando se generan otro tipo de defectos se aplica la misma metodología indicada anteriormente, por ejemplo si se tiene una fisura enterrada con bordes irregulares tendería a producir señales del borde superior e inferior intermitentes en la imagen escaneada. Al tratar de caracterizar los defectos de la aparición de tales señales, debe tenerse en cuenta que las señales discontinuas no surgen necesariamente de defectos discontinuos.

Barrido TOFD, scan-B indicando el brillo que produce un defecto semi-circular

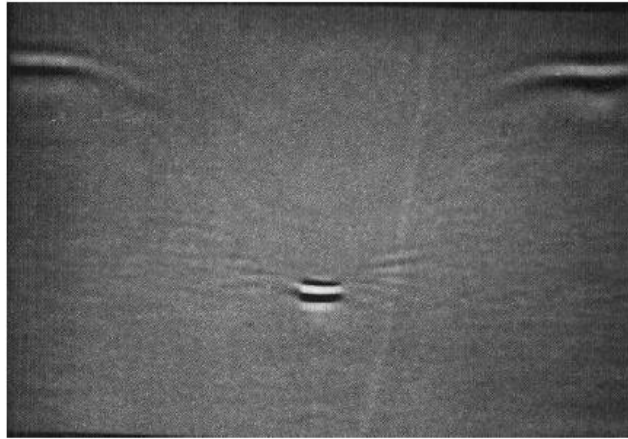


Figura 27. Barrido TOFD, scan-B indicando el brillo que produce un defecto semi-circular

Se muestra un brillo o punto flash del borde de un defecto semi-circular. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple., Temple J. A. G (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd.

### 3.5 Geometrías complejas

No solo en la construcción de hidroeléctricas, si no también en varias aplicaciones industriales existen tuberías soldadas que trabajan a alta presión, las soldaduras tienden a estar en regiones de alta tensión y por lo tanto requieren ser inspeccionadas para asegurar la integridad de la soldadura durante la fabricación y posiblemente para detectar el inicio y la propagación de fisuras en el componente inspeccionado durante el servicio.

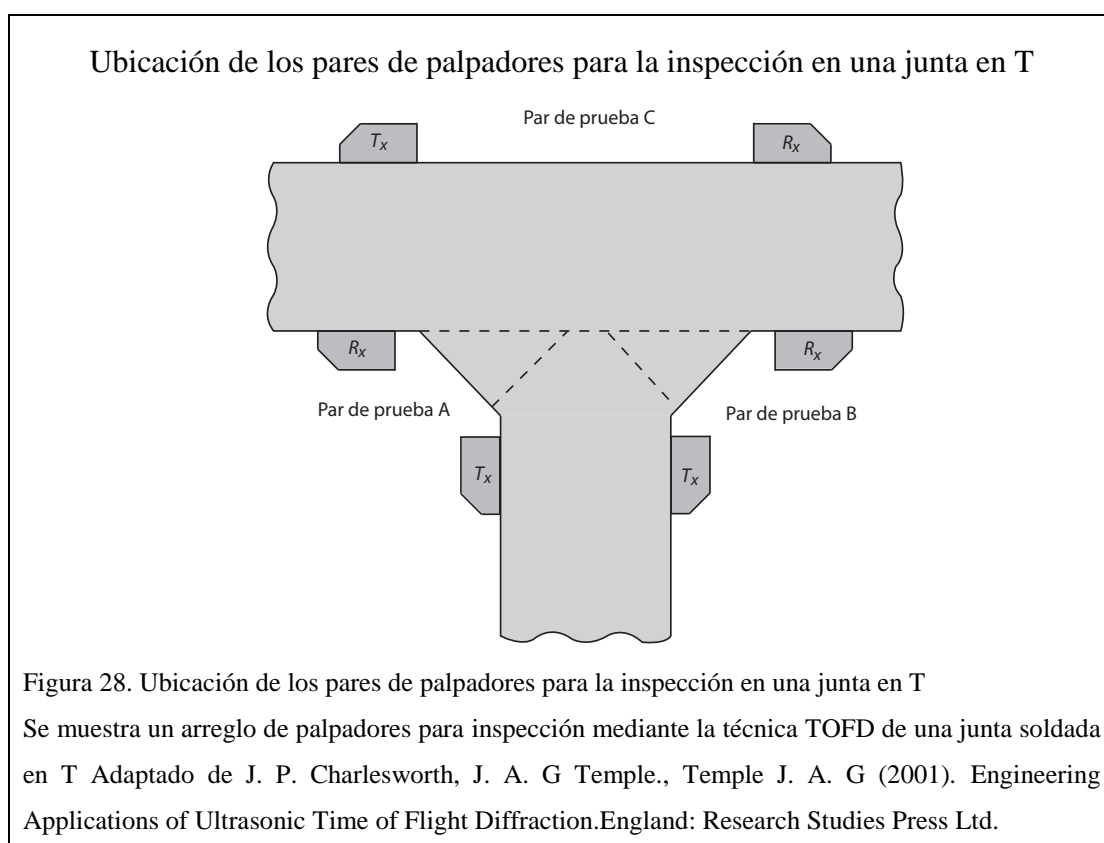
Cuando dos cilindros se intersecan, por ejemplo, dos componentes cilíndricos a lo largo de una estructura o una boquilla conectada a un recipiente de presión, la soldadura forma una especie de silla tridimensional. Los palpadores con un haz angular fijo, colocado en cualquiera de las superficies, no siempre pueden cubrir todo el volumen de

soldadura que se debe inspeccionar. Por lo tanto, el diseño de escáneres para tales geometrías requiere aún más cuidado que el que se toma con los escáneres para las geometrías más simples de placas planas. La técnica de TOFD abre nuevas alternativas para la inspección de geometrías complejas en comparación con las técnicas pulso-eco debido a la insensibilidad con la orientación relativa de palpadores y defectos. Con técnicas pulso-eco basadas en la reflexión especular, resulta muy difícil que los haces puedan escanear todas las áreas de interés, tales como soldaduras a una incidencia casi normal.

### **3.6 Soldaduras a tope**

El Instituto de Soldadura, el Laboratorio de Harwell y la Junta Central de Generación de Electricidad llevaron a cabo un programa de trabajo colaborativo sobre la detección ultrasónica, dimensionamiento y caracterización de grietas y otros defectos en componentes de acero. El trabajo se realizó en cuatro fases, la Fase 4 estaba dirigida específicamente a extender el trabajo sobre placas planas a geometrías más complejas. Material a BS 1501 grado 223-32B fue soldado en seis muestras con defectos deliberadamente creados y otras dos muestras fueron utilizadas de estructuras desechadas. En las muestras creadas, los defectos eran fisuras, escoria lineal, falta de fusión, porosidad y falta de penetración, mientras que en los otros dos ejemplares los defectos eran desgarros laminares. El TOFD se aplicó a la detección y dimensionamiento de la falta de fusión, fisuras y porosidad en dos soldaduras en T formadas a partir de dos placas, cada una de 38 mm de espesor, soldadas a penetración completa. La geometría y las ubicaciones de los palpadores TOFD se muestran en la Figura 28. Un scan-B obtenido con el par de palpador B de la Figura 48 se muestra en

la Figura 29. La primera señal, equivalente a la onda lateral en una placa plana, es una onda que sigue la superficie del palpador transmisor al palpador receptor, sufriendo difracción en los bordes del filete de soldadura. Se pueden ver señales claras de defectos en el metal de soldadura tanto delante como detrás de la señal continua que surge de la reflexión en la superficie lejana de la banda. Si bien la detección de defectos por este medio es sencilla, localizarlos y calibrarlos requiere un cuidadoso análisis de posibles trayectorias de onda, puntos de reflexión, difracción de características geométricas, conversiones de modo, etc.



La técnica TOFD demostró una precisión en las soldaduras en a tope en T similares a las que se pueden obtener en placas planas. La precisión inicial obtenida fue un error

de tamaño medio de 1,7 mm con una desviación estándar de 4,0 mm, pero esto mejoró a un error medio de 0,1 mm con una desviación estándar de 1,1 mm. Se cita a continuación las conclusiones del informe [Cameron, Jessop, Mudge, Charlesworth, Silk, Bowker, Wrigley y Denby, 1983]. . . “*La difracción por tiempo de vuelo parece haber sido adaptada con éxito para permitir la inspección de juntas complejas. La capacidad del ultrasonido convencional para predecir con exactitud el carácter de defecto ha demostrado nuevamente ser insuficiente para permitir que se deposite una alta confianza en la predicción.*”

Barrido TOFD, scan-B para junta soldada en T

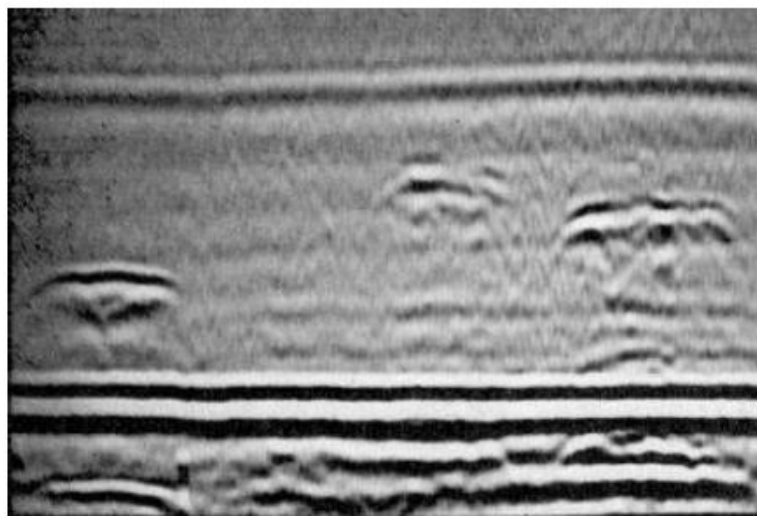


Figura 29. Barrido TOFD, scan-B para junta soldada en T

Se muestran señales observadas con la técnica TOFD en junta soldada en T. Adaptado de J. P. Charlesworth, J. A. G Temple., Temple J. A. G (2001). Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. England: Research Studies Press Ltd.



### **3.7 Aplicaciones de la técnica TOFD**

#### **3.7.1 Recipientes a presión No Nucleares**

(Anliker & Cilauro, 1988) usaron TOFD para detectar, dimensionar y perfilar fisuras en la superficie de un recipiente de presión caliente (200°C) usado en la industria de pulpa y papel.

(Yokote, , Ishizuka, Bagdasarian, Gougler , & Stellina, 1994) compararon el TOFD con el método de caída de 6 dB para el dimensionado de fisuras. Los recipientes, usados fueron reactores de hidroprocesamiento, y se hicieron de acero de 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub> Cr-1Mo revestido en la superficie interior con capas sucesivas de acero austenítico 310 y 308 con aproximadamente 150 mm de espesor. Estos tanques habían estado expuestos a 26 años de servicio a altas temperaturas y altos niveles de hidrógeno.

El rendimiento de las técnicas de ultrasonido se demostró en los bloques de prueba, antes de realizar los ensayos en los recipientes de presión. Las cinco fisuras de los recipientes probados se habían detectado previamente mediante radiografía y ultrasonido con la técnica pulso-eco. Tres de ellos fueron seccionados después de las pruebas de END y profundidades reales de las fisuras se obtuvieron mediante macrografías. Los resultados se muestran en la Tabla 2 Tanto en las técnicas pulso-eco y TOFD demuestra haber tenido un buen desempeño, pero la técnica TOFD se describe como tener una excelente precisión, mientras que la radiografía no fue satisfactoria.

Tabla 2. Resultado de la comparación del tamaño de un defecto a partir de 3 técnicas de inspección.

<i>Técnica inspección</i>	<i>de</i>	<i>Bloque 5</i>		<i>Bloque 6</i>	<i>Bloque 15</i>
Caída 6 dB	16.5	14.5	4.0	21.0	14.0
TOFD	16.0	10.0	5.9	-	11.0
Macrografía	15.0	9.0	-	18.0	-

Nota: Resultados del ensayo realizado al dimensionamiento de una fisura en el espesor de pared de un recipiente de presión de la industria de refinería petroquímica Adaptado de Yokote, Y., Ishizuka, T., Bagdasarian, A., Gougler, & Stellina, R. (1994). Detection and sizing of defects in heavy wall pressure vessel welds. Determining Material Characterization: Residual Stress and Integrity with NDE, PVP-vol 276, págs. 125-132. Minnesota.

### 3.8 Turbinas y componentes de generadores

(Browne, Automated ultrasonic examination of primary circuit welds., 1988) Ha citado el uso de la técnica TOFD en el dimensionamiento de fisuras en el disco de turbinas. (Lilley & Pitcher, 1989) Describen la detección y dimensionamiento de fisuras en ejes de rotor de turbinas. Afirman que las fisuras axiales en el cilindro y las fisuras radiales en la superficie externa se detectan y dimensionan fácilmente usando palpadores en la superficie del agujero y citan una exactitud de  $\pm 0,1$  mm. También informan de que las marcas de playa individuales de una fisura creciente por fatiga se pueden distinguir en una imagen TOFD scan-D, siempre y cuando las señales cercanas estén separadas en el tiempo por lo menos  $1\frac{1}{2}$  períodos de onda.

(Ashwin, 1989) También ha aplicado la técnica TOFD a anillos de retención y discos de turbina y reivindica mejoras en la precisión del dimensionamiento comparado con

las técnicas pulso-eco, así como un reconocimiento más rápido de las señales de defecto.

(Dube & Helleringer, 1989) Estudiaron las fisuras por tensión-corrosión y fisuras por fatiga en rotores de turbina de baja presión utilizados en centrales nucleares. Utilizando un sistema computarizado TOFD fueron capaces de obtener resultados rápidos y repetibles y dimensionamiento de las fisuras en sitio, en las muestras tomadas de un rotor de turbina de vapor a baja presión, se encontró concordancia entre los datos de inspección TOFD y el ensayo destructivo.

(Day, 1992) Utilizó un sistema automatizado TOFD para inspeccionar los anillos de retención de un generador en una planta de energía geotérmica en Nueva Zelanda. Estos anillos fueron hechos de diferentes tipos de acero: acero al carbono, acero austenítico y acero martensítico. Cada tipo de acero se asocia con diferentes tipos de defectos y ubicaciones, por lo que se puede utilizar diferentes procedimientos de inspección. Las fallas en material ferrítico y martensítico se podían dimensionar con precisión usando TOFD y la ventaja de tal capacidad se demostró mediante la verificación de una falla conocida en un anillo final martensítico. La fisuración por tensión-corrosión en la pared trasera de los anillos finales hechos de acero austenítico no se pudo detectar de forma fiable con ultrasonidos convencionales. Sin embargo, utilizando TOFD, fue posible utilizar las diferencias de fase entre las señales para distinguir las señales de punta de fisura de las reflexiones de la pared de fondo, o de los cambios de forma que ocurren con el encogimiento de los anillos.

(Nottingham & MacDonald, 1990) También se ocuparon de detectar fisuras por tensión-corrosión intergranular en anillos de retención. Ellos encontraron que el TOFD era ventajoso para discriminar las fisuras de los reflectores geométricos y concluyó que;

*“el TOFD era el único método investigado que podría usarse para estimar la profundidad de una fisura con confianza”.*

### **3.8.1 Inspección general en la soldadura y supervisión en plantas**

Una aplicación novedosa de la técnica incorpora el uso de láseres para generar y recibir ultrasonidos (Scruby, Dewhurst, Hutchins , & Palmer, 1982) para inspeccionar anillos de acero caliente para detectar defectos antes de la laminación. (Browne, 1990) sostiene que la técnica TOFD no debe limitarse sólo a aplicaciones muy exigentes de NDT, sino que puede implementarse como un medio muy efectivo y rápido en la detección de defectos, con informes significativos sobre muchas tareas de inspección de soldadura a un costo menor que significaría usar métodos más tradicionales. (Verkooijen, 1995) Informa que el uso de la técnica TOFD como alternativa a la radiografía durante la construcción de una refinería en Rotterdam ha dado lugar a importantes ahorros de costes y a una mayor confianza en el producto final.

### **3.8.2 Monitoreo en el crecimiento de defectos**

(Cecco & Broomfield, 1984) Midió los perfiles de fisuras por fatiga en muestras de fractura por tensión compacta usando la técnica TOFD. (Mudge, Ultrasonic time of flight measurement of fatigue pre-crack depth in fracture toughness specimens, 1980) Describe el uso de la técnica para la medición de las profundidades pre-fisura en muestras de tenacidad a la fractura. (Sigmond & Lien, 1980) Lo usaron para realizar la medición in-situ del crecimiento de fisuras por fatiga en muestras de una sola muesca.

(Silk, Hillier, & Robertson, 1986) Demostraron que la técnica TOFD era una técnica adecuada para monitorear el crecimiento de defectos en un reactor hidrocraqueo en la refinería Grangemouth de British Petroleum. Durante las paradas de la planta se controló una región agrietada del reactor con cuatro exploraciones realizadas entre 1982 y 1985. La precisión con la que se puede monitorear el crecimiento de defectos depende del equipo utilizado, de la exactitud con la que se pueden repetir los escaneos de un año a otro, y de la migración de fisuras crecientes desde una línea de escaneo a otra con la posición y el tiempo.

### **3.8.3 Inspección en puentes de acero**

Una aplicación es el dimensionamiento de defectos en puentes de acero (Mudge & Duncumb, 1985). La mayor parte de los puentes ya han tenido una larga vida útil, sin embargo no se puede cuantificar la integridad de su estructura.

Las normas internacionales confían en la capacidad de los ensayos no destructivos para detectar y evaluar discontinuidades conforme se señala en el Código de soldadura estructural AWS D1.1 y en la norma Británica BS 5400, por poner dos ejemplos. Sin embargo, (Mudge & Duncumb, 1985) demostraron que, utilizando estos procedimientos ultrasónicos, se aceptan una alta proporción de fisuras con un tamaño igual al 7,5% del grosor de pared y un 30% de posibilidad de aceptar fallas aún mayores. Estos defectos más grandes, juzgados incorrectamente como aceptables, eran planos por naturaleza. En comparación, en muestras representativas de las que se encuentran en las bridas de tensión principales en estructuras de un puente de acero, (Mudge & Duncumb, 1985) fueron capaces de lograr una precisión media de 0,2 mm con una desviación estándar de 1,0 mm para el tamaño de la pared a través de 21 defectos

planares en muestras De 10 a 95 mm de espesor con el dimensionamiento de difracción de tiempo de vuelo. La técnica de caída de 20dB aplicada al mismo conjunto de defectos produjo una precisión media de sólo -4,8 mm con una desviación estándar de 3,1 mm. Mudge y Duncumb concluyeron que *"los tamaños muy pequeños de defectos significativos para las clases de fatiga más altas en los puentes, impiden el uso de técnicas de dimensionamiento ultrasónico del movimiento de sonda para evaluarlas. También se ha demostrado que las técnicas de comparación de amplitud simples son inadecuadas. . . Las pruebas de ultrasonido de tiempo de vuelo tienen el potencial de calibrar pequeñas fallas. . ."*

## **CAPÍTULO 4**

### **PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN DE SOLDADURA, POR ULTRASONIDO CON LA TÉCNICA DIFRACCIÓN POR TIEMPO DE VUELO SEGÚN ASME VIII**

#### **4.1 Objetivo**

Este procedimiento describe los requerimientos para la examinación de juntas a tope y de penetración completa para tubería de presión, conforme lo establecido en el ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII (ASME, 2015)

#### **4.2 Alcance**

El alcance de este procedimiento permitirá:

- Calibrar equipos de ultrasonido para la técnica Difracción por tiempo de vuelo, a usarse en la inspección de cordones de soldadura en tubería sometida a presión interna.
- Establecer la metodología para realizar la inspección de soldadura por ultrasonido TOFD para detectar, localizar y evaluar discontinuidades en cordones de soldadura.

#### **4.3 Documentos de referencia**

- ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sección VII, Div. 1, Apéndice 12 (ASME, 2015)
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sección V, Artículo 4. (ASME, 2015)

- ASNT Práctica recomendada SNT TC-1A 2011. (ASNT, 2011)
- ASTM E2373; Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique. (ASTM, 2014)

#### **4.4 Personal responsable de la aplicación del procedimiento**

El personal que efectúe la inspección, evaluación e interpretación de resultados mediante la aplicación del método de ultrasonido, aplicando el presente procedimiento estará certificado conforme lo indica la práctica recomendada SNT-TC-1A como inspector nivel I, inspector nivel II y/o inspector nivel III; y será responsable de las actividades que se exponen a continuación:

##### **4.4.1 Inspector nivel I**

El inspector nivel I será responsable de:

- Preparar los equipos, elementos y materiales necesarios para realizar la inspección.
- Verificar la calibración del equipo antes de realizar la examinación.

El inspector nivel I podrá:

- Realizar el proceso de examinación de la soldadura de acuerdo a este procedimiento, sin embargo, no podrá realizar ninguna interpretación de resultados.

##### **4.4.2 Inspector nivel II**

El inspector nivel II será responsable de:

- Realizar la calibración del equipo previa la examinación de acuerdo con el presente procedimiento.



- Realizar el proceso de examinación de la soldadura de acuerdo a este procedimiento.
- Interpretar y evaluar los resultados que se darán en el transcurso de la inspección.
- Elaborar los registros de inspección correspondientes.

#### **4.4.3 Inspector nivel III**

El inspector nivel III será responsable de:

- Ejecutar todas las actividades asignadas al inspector nivel II, y podrá asumir la responsabilidad sobre ellas, en caso de que NO exista un inspector nivel II, realizando las tareas de inspección.
- Revisar y aprobar este procedimiento de inspección.

### **4.5 Procedimiento**

#### **4.5.1 Equipo y accesorios**

##### **-Equipo**

Para la ejecución del presente procedimiento aplicado en la inspección, se utilizará equipos OmniScan SX, MX, MX2 (Olympus). Las inspecciones serán complementadas con los Transductores ultrasónicos (palpadores) detallados en el punto 4.6.1.2.

Cuando fuere el caso y se utilicen equipos diferentes a los mencionados, estos deberán cumplir los requerimientos técnicos establecidos en el ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sección V, Artículo 4.

El equipo para detección de defectos cumplirá los parámetros mandatorios descritos a continuación:

- a) El equipo proporcionará una presentación de barrido lineal scan-A tanto para la configuración de los parámetros de exploración como para el análisis de la señal.
- b) La linealidad del instrumento será tal que la precisión de la amplitud o del tiempo indicado sea  $\pm 5\%$  de la amplitud o del tiempo real a escala real.
- c) El pulsador ultrasónico puede proporcionar tensión de excitación por tono burst, unipolar u onda cuadrada bipolar.
- d) El ancho de pulso debe ser sintonizable, para permitir la optimización de la amplitud y duración del impulso.
- e) El ancho de banda del receptor ultrasónico debe ser al menos igual al de la frecuencia nominal de la sonda, y tal que la anchura de banda -6dB de la sonda no caiga fuera de la anchura de banda -6dB del receptor.
- f) El control de ganancia del receptor estará disponible para ajustar la amplitud de la señal en incrementos de 1dB o menos. En caso de ser necesario se incluirán pre-amplificadores en el sistema.
- g) La conversión analógica a digital de las formas de onda tendrá una frecuencia de muestreo al menos cuatro veces mayor que la frecuencia nominal de la sonda. Cuando el procesamiento de señales digitales se lleve a cabo en los datos brutos, éste se aumentará a ocho veces la frecuencia nominal de la sonda.
- h) La visualización de datos permitirá la vista no codificada de la exploración scan-A de modo que la posición de inicio y la longitud de la compuerta determine la extensión de la base de tiempo de la exploración scan-A que se registra.
- i) El equipo permitirá el almacenamiento de todas las exploraciones scan-A a un medio de almacenamiento magnético u óptico.

- j) El equipo proporcionará una vista en sección de la soldadura con un mínimo de 64 niveles de escala de grises.
- k) El software de computadora para las pantallas de TOFD incluirá algoritmos para linealizar cursores o la base de tiempo de la longitud de onda para permitir estimaciones de profundidad y longitud vertical.
- l) El almacenamiento de datos de longitudes de onda incluirán detalles de amplitud y base de tiempo, el equipo también almacenará información de posición indicando la posición relativa de la longitud de onda con respecto a la forma de onda adyacente, es decir, posición codificada.

#### **-Palpadores**

Se utilizarán dos palpadores dispuestos como receptor-transmisor (par TOFD), cada par de palpadores tendrá la misma frecuencia nominal, así como el mismo tamaño y cumplirán con los requisitos mandatorios descritos a continuación:

- a) La duración del pulso del palpador no excederá los 2 ciclos, medido 20dB más abajo del pico máximo.
- b) Según la aplicación los palpadores estarán enfocados o desenfocados, en el caso de que se encuentren desenfocados se utilizarán para la detección, mientras que los enfocados se utilizaran para obtener una resolución mejorada del dimensionamiento.
- c) La frecuencia nominal será de 2 MHz a 15 MHz, a menos que las variables, como la estructura del grano del material, requieran el uso de otras frecuencias para asegurar una penetración adecuada o una mejor resolución.

- d) Se utilizarán soportes mecánicos para asegurar que el espacio entre palpadores mantenga a una distancia fija. Los soportes mecánicos también asegurarán la alineación con el eje de barrido deseado en el elemento a inspeccionar. El movimiento del soporte mecánico con los palpadores se puede lograr utilizando medios motorizados o manuales y estará equipado con un codificador de posición que esté sincronizado con el muestreo de las exploraciones A.

#### **-Acoplante**

Cualquier acoplante comercial como agua, metil celulosa (gel) o aceite podrá ser utilizado; siempre que la misma sustancia sea utilizada para la calibración, calificación y examinación.

En acuerdo con el representante técnico del cliente se garantizará que el acoplante seleccionado es técnica y químicamente compatible con la aplicación y los requerimientos del código de referencia.

#### **-Encoder (codificador de avance)**

Los codificadores se calibrarán según las recomendaciones del fabricante y se confirmarán moviendo una distancia mínima de 500 mm y la distancia visualizada será  $\pm 1\%$  de la distancia real desplazada. Esta verificación se la realizará en intervalos que no excedan de un mes o antes del primer uso posterior.

#### **4.5.2 Calibración general del equipo (linealidad)**

El equipo de ultrasonido será calibrado al menos una vez por año a través del fabricante o una entidad que cumpla los requisitos técnicos por las normas o códigos aplicables para el efecto.

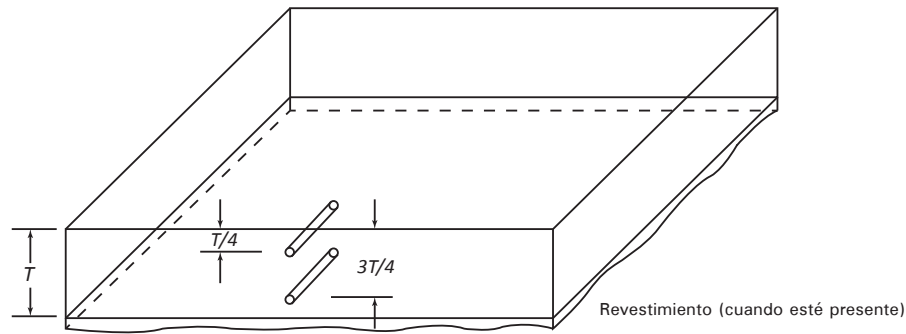
### **4.5.3 Calibración para examinación**

#### **-Bloques de calibración para tubería**

Conforme a lo establecido en T-434.1.7.1 (ASME Sección V Artículo 4), para las examinaciones en tubería donde el diámetro es mayor de 500 mm (20 in), se puede utilizar un bloque básico de calibración plano de manera alternativa a un bloque de calibración realizado en tubería del mismo diámetro, el bloque básico de calibración plano a usarse es el indicado en la Figura 30 o Figura 31 según sea la tipo de examinación a realizarse.

## Bloque plano de calibración para una zona de referencia

Figura III - 434.2.1(a)  
Bloque de referencia TOFD



Espesor de la soldadura, plg (mm)	Diámetro del agujero, plg (mm)
Hasta 1 (25)	$\frac{3}{16}$ (2.5)
Sobre 1 (25) a través de 2 (50)	$\frac{1}{8}$ (3)
Sobre 2 (50) a través de 4 (100)	$\frac{1}{16}$ (5)
Sobre 4 (100)	$\frac{1}{4}$ (6)

### NOTAS GENERALES:

- Los orificios de  $T/4$  deben ser taladrados y ensanchados con una profundidad mínima de 2 plg (50 mm), esencialmente paralelos a la superficie de examinación y a la dirección de escaneo.
- Tolerancia del agujero:* La tolerancia en el diámetro deberá ser  $\pm \frac{1}{32}$  pulg. ( $\pm 0.8$  mm). La tolerancia en la ubicación a través del espesor de la pared será de  $\pm \frac{1}{8}$  pulg. ( $\pm 3$  mm)
- Todos los agujeros deben estar ubicados en la misma cara (lado) del bloque y alineados aproximadamente al centro de la cara (lado) a menos que la indicación de un reflector afecte la indicación de otra. En estos casos, los orificios pueden estar situados en caras opuestas (lados) del bloque.
- Cuando la soldadura se divida en múltiples zonas, cada zona tendrá un orificio taladrado  $T_z/4$  y  $T_z/3$ , donde  $T_z$  es el espesor de la zona.
- Para los componentes  $\leq 20$  pulg. (500 mm) de diámetro, el diámetro del bloque de calibración debe cumplir con los requisitos de T-434.1.7.2.

Figura 30. Bloque plano de calibración para una zona de referencia

Se Muestra la Figura Figura III-434.2.1(a) de un bloque de calibración para la técnica TOFD, tomado de ASME. (2015). Section V: Boiler and Pressure Vessel Code, Article 4. Nueva York

Para examinaciones en tubería con diámetros iguales o menores a 500 mm (20 in) no existe la capacidad para realizar la inspección utilizando la técnica difracción por tiempo de vuelo, debido a que los reflectores no se pueden comparar o verificar con un bloque de calibración.

## Bloque plano de calibración para varias zonas de referencia

Figura III - 434.2.1(b)  
Ejemplo de Bloque de referencia para Dos Zonas

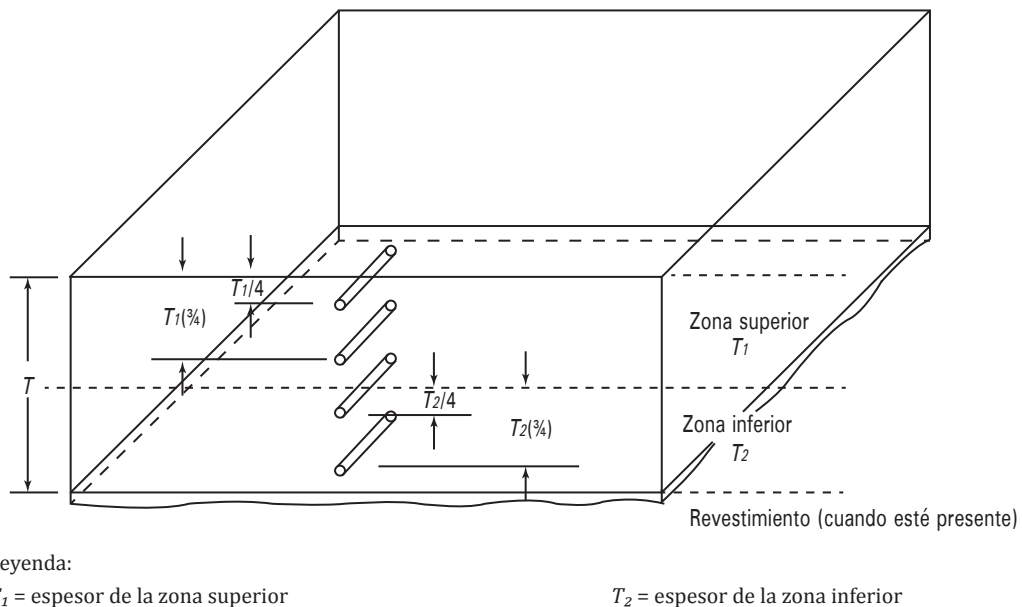


Figura 31. Bloque plano de calibración para varias zonas de referencia

Se muestra la Figura III-434.2.1(b) de un Bloque de calibración para dos zonas de referencia mediante la técnica TOFD, tomado de ASME. (2015). Section V: Boiler and Pressure Vessel Code, Article 4. Nueva York

### -Calibración

Para empezar con la calibración es necesario realizar los siguientes pasos:

- Ajustar la sensibilidad de referencia que consiste en colocar el par de palpadores TOFD en la superficie del bloque de calibración.
- Ajustar el control de ganancia para que la amplitud de la onda lateral sea del 40% al 90% de la altura completa de la pantalla y el nivel de ruido sea inferior al 5% a 10% de la altura completa de la pantalla. Cuando se necesita examinar

zonas múltiples en donde la onda lateral no es visible o tenue, se debe ajustar el control de ganancia basado únicamente en el nivel de ruido.

- c) Confirmar la sensibilidad mediante el escaneo de los agujeros laterales del bloque de calibración, los cuales están centrados entre los palpadores, con el nivel de sensibilidad de referencia esta establecido en el punto 2. Las respuestas de los agujeros laterales del bloque de calibración requeridos serán de un mínimo de 6 dB por encima del ruido de grano y aparecerán los resultados en la pantalla digitalizada en escala de grises
- d) Examinar en la zona multiple cuando la soldadura se divide en multiples zonas, se repetirá lo indicado en el punto 2 y 3, para cada par de sondas TOFD. Además, se detectará el agujero laterla más cercano en la (s) zona (s) adyacente (s).
- e) Determinar el ancho de la confirmación de cobertura, mediante la realización de dos dos exploraciones adicionales conforme el punto 3 con las sondas desplazadas a ambos lados del borde de soldadura de la zona aplicable  $\pm 13$  mm. Si no se detectan todos los orificios requeridos, se requieren dos exploraciones offset adicional con las sondas compensadas por la distancia (s) identificada anteriormente como se indica en la Figura 32.



## Compensación del escaneo

Figura III - 463.5  
Escaneos Offset

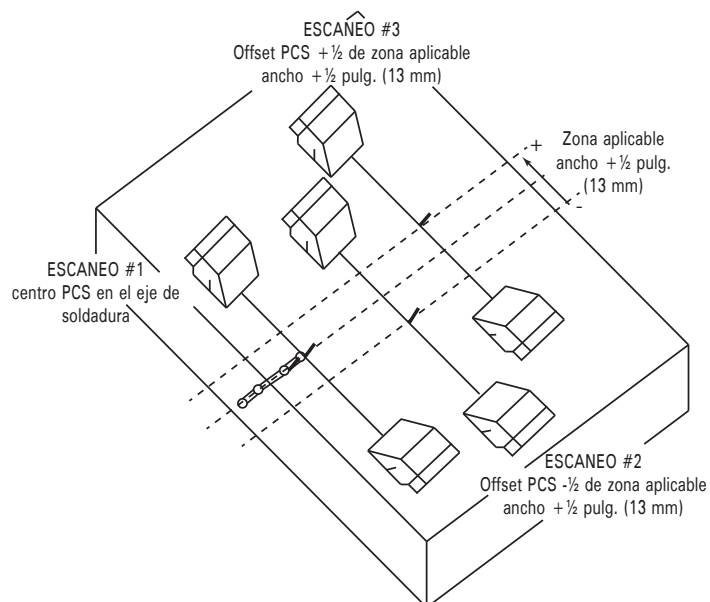


Figura 32 Compensación del escaneo

Se muestra la Figura III-463.5 de un escaneo por compensación en el que se toman diferentes líneas centrales como eje de escaneo, tomado de ASME. (2015). Section V: Boiler and Pressure Vessel Code, Article 4. Nueva York

### 4.5.4 Examinación

#### ***-Inspección de soldadura (evaluación de la conformidad del cordón de soldadura)***

Para realizar la examinación del volumen de soldadura se llevarán a cabo los pasos que a continuación se describen:

- Preparar el material base o la superficie de soldadura de tal manera que no interfiera con el examen.
- Colocar el par de palpadores TOFD centrados y transversales al eje de soldadura
- Desplazar el par de palpadores de forma paralela a lo largo del eje de soldadura.

- d) Verificar que la superposición mínima entre las exploraciones adyacentes será de 1 pulg. (25 mm).
- e) Si se requieren exploraciones de compensación debido al ancho de la soldadura, se repetirá el escaneado inicial con los palpadores desplazados hacia un lado del eje de soldadura y de nuevo con el desplazamiento al lado opuesto del primer desplazamiento.
- f) Se utilizará una distancia máxima de la muestra de 0.040 pulg. (1 mm) entre las examinaciones con scan-A recogidos para espesores inferiores a 50 mm (2 in.) Y una distancia de la muestra de hasta 0.080 pulg. (2 mm) para espesores superiores a 50 mm (2 pulg.).
- g) La velocidad de repetición de pulsos será lo suficientemente pequeño como para asegurar que una señal procedente de un reflector situado a la distancia máxima en el volumen de examen llegará de nuevo al palpador antes de que se coloque el siguiente impulso en el transductor.
- h) La velocidad de movimiento del palpador (velocidad de escaneado) no excederá 6 in./s (150 mm / s), a menos que:
  - La velocidad de repetición del pulso del equipo ultrasónico sea suficiente para impulsar el palpador al menos seis veces dentro del tiempo necesario para mover la mitad de la dimensión del transductor (elemento piezoeléctrico) paralela a la dirección de la exploración a la velocidad de exploración máxima,
  - Se efectúe una calibración dinámica en reflectores múltiples, que se encuentran dentro de los 2 dB de una calibración estática y la tasa de

repetición de pulsos cumple los requisitos indicados en este procedimiento.

- i) Ajustar el nivel de sensibilidad de la exploración a un mínimo de 6 dB más alto que el ajuste de la ganancia del nivel de referencia o, cuando se utilice una técnica semiautomática o automática, puede ajustarse al nivel de referencia.
- j) El nivel de ganancia utilizado para la exploración será apropiado para la configuración que se esté examinando y debe ser capaz de detectar los reflectores de calibración a la velocidad de exploración máxima.
- k) Todos los datos presentados en modo Scan-A serán grabados para el área de interés en una forma no procesada, la grabación de datos del scan-A se pondrá en marcha justo antes de la onda lateral y, como mínimo, no terminará hasta que se registre toda la primera señal de la pared de fondo con tolerancia para las variaciones de grosor y desajuste. Se pueden obtener datos útiles a partir de señales en modo de conversión. Por lo tanto, el intervalo entre la primera señal de la pared de fondo y la señal en modo de conversión de la pared de fondo también se incluirá en los datos recogidos cuando así lo requiera el Código de Referencia.
- l) Se realizará un examen de haz angular para reflectores transversales al eje de soldadura, a menos que la Sección de Código de referencia especifique un examen TOFD. En estos casos, coloque cada par de palpadores TOFD paralelo al eje de soldadura y mueva el par de palpadores a lo largo y hacia abajo del eje de soldadura. Si el refuerzo de soldadura no está alisado a tierra, coloque los palpadores sobre el material de la placa adyacente de manera que sea paralela al eje de soldadura como sea posible.

m) En el caso de que el espesor del material a examinar sea demasiado ancho y se necesite una examinación de zonas múltiples se repetirá el proceso indicado en este procedimiento.

#### **4.5.5 Manejo de datos**

Un mapa de soldadura (welding map) será proporcionado por el cliente con la nomenclatura o nombre de las juntas que serán inspeccionadas por Ultrasonido (UT), estos nombres serán ingresados en el equipo de UT con los que se generarán los archivos de inspección; una copia impresa de estos archivos será entregada al cliente como reporte de inspección. En el caso de que el cliente considere necesario, se le facilitará una copia digital de cada archivo en el formato que originalmente emite el equipo de Ultrasonido.

El técnico de Ultrasonido (Inspector Nivel II ó Nivel III), en obra, será el responsable de mantener los archivos digitales (originados por el equipo de Ultrasonido) asociados de una manera clara y ordenada, con la información (mapa de soldadura) proporcionada por el cliente. El total de los archivos digitales del Ultrasonido será entregado al cliente, al final del proyecto. En el caso de existir requerimientos adicionales diferentes, respecto a este tema, se acordará con el cliente los lineamientos a seguir, al inicio del proyecto.

Luego de la culminación de cada inspección, se guardarán una copia de los datos arrojados por el equipo de Ultrasonido en memorias USB, PC, o discos externos.

#### **4.5.6 Interpretación y evaluación**

##### ***-Criterio de investigación***

Los criterios que el inspector o técnico de ensayos no destructivos debe considerar para investigar un posible defecto será cuando:

- a) Los reflectores produzcan una respuesta mayor al 20% del nivel de referencia; la investigación diferenciará si las indicaciones son producto de discontinuidades o de indicaciones geométricas.

En el caso de que los reflectores sean determinados como discontinuidades, entonces serán evaluados y sometidos a la aplicación de los criterios de aceptación y rechazo correspondientes.

##### ***-Interpretación de indicaciones de origen geométrico/metalúrgico***

Indicaciones ultrasónicas de origen geométrico o metalúrgico serán interpretadas como sigue:

- a) Indicaciones que se determinen originarse en una configuración superficial (tales como sobremonta de la soldadura o geometría de la raíz) o en la variación de la estructura metalúrgica de los materiales, pueden ser interpretadas como “indicaciones geométricas” y no necesitan ser categorizadas, dimensionadas ni sometidas a evaluación aplicando el criterio de aceptación/rechazo correspondiente. Sin embargo se deberá documentar la amplitud máxima de las indicaciones y su localización.
- b) Para clasificar una indicación como geométrica se deberá:

-Interpretar el área que contiene la indicación, en concordancia con este procedimiento de examinación.

-Trazar y verificar las coordenadas de la indicación; trazar un corte transversal de la soldadura y ubicar la posición de la indicación (raíz o contorno-sobremonta).

-Otro método o técnica de ensayos no destructivos podrá ser utilizado para demostrar que una indicación es geométrica (por ejemplo: Ultrasonido Phased Array ó radiografía).

***-Criterio de aceptación y rechazo (ASME B&PVC SEC. VIII)***

Los criterios de aceptación y rechazo se estipulan de acuerdo a lo indicado en el ASME SEC. VIII (Div. 1, Apéndice 12).

Las imperfecciones que produzcan una reflexión mayor que el 20% del nivel de referencia, deben ser investigadas en toda su extensión para que el operador pueda determinar la forma, identidad y localización de tales imperfecciones y evaluarlas en términos de los estándares de aceptación siguientes:

- a) Indicaciones caracterizadas como fisuras, falta de fusión, o penetración incompleta son inaceptables sin importar su longitud.
- b) Otras imperfecciones, diferentes a las indicadas en el párrafo anterior son inaceptables si sus indicaciones exceden el nivel de amplitud de referencia y que su longitud exceda de:

-1/4 de pulgada para materiales de espesores de menos o igual a 3/4 pulgada.

- $\frac{1}{3}$  del espesor del material para materiales con un espesor mayor de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, pero inferior o igual a  $2\frac{1}{4}$  de pulgada.

- $\frac{3}{4}$  de pulgada para materiales de espesor mayor de  $2\frac{1}{4}$  de pulgada.

### ***-Reparaciones***

Cuando se realice un muestreo progresivo de ultrasonido, y si alguna examinación puntual o aleatoria revela un defecto, se deberá proceder como sigue:

- a) Dos muestras adicionales del mismo tipo de soldadura será sometidas a la misma examinación.
- b) Si ambas muestras son aceptables, la muestra con defecto (detectada inicialmente) será reparada o reemplazada y reexaminada por el mismo método inicial y todas las juntas soldadas representadas por las dos muestras adicionales serán aceptadas.
- c) Si una de las dos muestras adicionales revela un defecto, entonces se pedirá que el cliente emita por escrito el criterio a seguir, para liberar las justas soldadas del equipo o elemento inspeccionado.
- d) Si luego de realizar una reparación, mediante examinación, se detecta nuevamente el defecto; la junta soldada será reparada o reemplazada y re-examinada con el método original de inspección hasta que se aceptable por los requerimientos y especificación propias del cliente.

#### ***-Documentación de discontinuidades***

Se registrará cada discontinuidad inaceptable y todas aquellas que excedan el 50% del nivel de referencia, para técnicas basadas en amplitud, o que excedan el 75% de la longitud aceptable para técnicas NO basadas en amplitud.

#### **4.5.7 Limpieza pos-examinación**

El cliente detallará, en los documentos contractuales, los requerimientos de limpieza luego de que se ha realizado la inspección.

#### **4.5.8 Registros**

Los registros de inspección serán generados por el software del equipo de ultrasonido, los mismos que serán impresos y entregados al cliente.

En el caso de requerimiento puntual del cliente, se podrá cortar las imágenes de inspección y pegarlas en un formato de inspección por ultrasonido TOFD, propiedad del cliente.



## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

- La técnica de ultrasonido Difracción por tiempo de vuelo en comparación con otras técnicas pulso-eco permite reconocer y visualizar discontinuidades con mayor precisión y optimiza el tiempo de inspección, entregando datos en tiempo real.
- El control de calidad en la soldadura de tubería de presión utilizando la técnica ultrasónica difracción por tiempo de vuelo disminuyó en un 20% los costes por hora-hombre con respecto a la técnica de ultrasonido Arreglo de Fases.
- Esta técnica no es aplicable para evaluación y detección de discontinuidades en tuberías de presión menores a 500 mm (20”) de diámetro interno.
- Una de las variables importantes para mantener la fiabilidad de la técnica de inspección TOFD es el área de la zona muerta; a menor espesor menor zona muerta y mayor fiabilidad, mientras que a mayor espesor, mayor zona muerta y menor fiabilidad.
- La técnica ultrasónica Difracción por tiempo de vuelo demostró una eficacia mayor del 10% en espesores mayores a 13 mm con respecto a otras técnicas de inspección mediante la técnica pulso – eco, aplicada en tubería de presión.

#### **5.2 Recomendaciones**

- Considerar la aplicación del procedimiento especificado en la presente investigación como herramienta práctica a ejecutar durante los trabajos de inspección en tuberías expuestas a alta presión

- Innovar la aplicación de técnicas de ensayos no destructivos, mediante la investigación, la cual deberá ser promovida por empresas públicas o privadas para generar procesos de optimización de recursos y mejora en la calidad de profesionales.
- Considerar la utilización de los procedimientos escritos aplicables por los técnicos, inspectores y personal en contacto con los ensayos no destructivos.
- Complementar la aplicación de la técnica de inspección TOFD, a tubería de alta presión con la técnica ultrasónica Arreglo de Fases, puesto que permite mejorar la fidelidad de la inspección en las 2 zonas muertas que se generan al utilizar únicamente TOFD, ventajosamente los equipos de detección de defectos tienen el software habilitado para la aplicación de la técnica TOFD y Arreglo de fases.
- Considerar el desarrollo de investigaciones sobre las técnicas de ensayos no destructivos dentro de los centros de estudio con la participación de los docentes encargados del área de soldadura, para que de esta manera los estudiantes reciban una adecuada guía en cuanto a últimos avances tecnológicos de inspección y equipos relacionados a la soldadura se refiere.

## Bibliografía

- Achenbach, J. D. (1973). *Wave Propagation in Elastic Solids*. North Holland, Amsterdam.
- Achenbach, J. D., Gautesen, A. K., & McMaken, H. (1982). *Ray Methods for Waves in Elastic Solids: with Applications to Scattering by Cracks*. Boston.
- Anliker, D., & Cilauro, S. (1988). Computer-assisted ultrasonic detection and measurement of cracks in pressure vessels. *Tappi Journal*, 41-45.
- Ashwin, P. (12-15 de Septiembre de 1989). Proceedings: Steam Turbine/Generation NDE Work-Shop. *Time of flight diffraction technique and applications for retaining rings and turbine discs*. Charlotte, Carolina del Norte, Estados Unidos: Electric Power Research Institute.
- ASM International. (1997). *Handbook Vol. 17: Non Destructive Evaluation and Quality Control*. United States: ASM Interntational.
- ASME. (2015). *Boiler & Pressure Vessel Code: Section VIII, Div I*. Nueva York.
- ASME. (2015). *Section V: Boiler and Pressure Vessel Code*. Nueva York.
- ASNT. (2011). *Perssonel Qualification and Certification in Nondestructive Testing*. Columbus.
- ASTM. (2014). *E2373: Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique*.
- Browne, W. (1988). Automated ultrasonic examination of primary circuit welds. (S. P. Limited., Ed.) *Nuclear Technology International*, 171-174.
- Browne, W. (1990). Reliable and cost-effective in-service weld inspection using time-of-flight diffraction. *Welding & Metal Fabrications*,, 153.

- Cecco, V., & Broomfield, G. (1984). *B-scan displays of ultrasonic time-offlight diffraction tests of compact tension specimens*. U.K.A.E.A.
- Charlesworth, J. P. (1984). Inspection of the near-surface defect. *British journal of non-destructive testing*.
- Charlesworth, J. P., & Temple, J. A. (2001). *Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction*. Hertfordshire: Research studies press ltd.
- Coffey, J., & Chapman, R. (1983). Application of elastic scattering theory for smooth flat cracks to the quantitative prediction of ultrasonic detection and sizing. *Nucl. Energy*, 319 – 333.
- Crawford, F. (1994). *Ondas*. España : Editorial Reverte.
- Day, P. (1992). Experience in the routine application of Zipsan time-of-flight diffraction techniques to the in-service examination of generator end rings. *British Journal Non Destructive Testing*, 9-14.
- Dube, N., & Helleringer, H. (12-15 de Septiembre de 1989). Proceedings: Steam Turbine/Generation NDE Workshop. *Time of flight diffraction technique used*. Charlotte, Carolina del Norte, Estados Unidos: Electric Power Research Institute.
- Golan, S. (1981). *Optimization of the crack-tip ultrasonic diffraction technique for* *Optimization of the crack-tip ultrasonic diffraction technique for*.
- Hainess, N., Langston, D., & Wilson, R. (1982). *Assessment of the reliability of ultrasonic inspection methods*. Londres: Mechanical Engineering Publications.
- Hellier, C. (2003). *Handbook of Nondestructive evaluation*. Mc GrawHill.
- Henneke, E. (2007). Ultrasonic wave propagation. En G. Workman, *Nondestructive Testing Handbook Vol 7* (págs. 36-56). Columbus: ASNT.

- Keller, J. (1962). Geometrical theory of diffraction. *J. Opt. Soc. Am*, 116-130.
- Lilley, J., & Pitcher, J. (1989). Proceedings of the 12th World Conference on Non-Destructive Testing,. *Underclad crack detection, sizing and monitoring*, (págs. 23-28). Amsterdam.
- Marshall, W. (1982). *An Assessment of the Integrity of PWR Pressure Vessels*. U.K.A.E.A., Londres.
- Montgomery, D. (2009). *Introduction to Statical Quality Control*. Danvers: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Mudge, P. (1980). Ultrasonic time of flight measurement of fatigue pre-crack depth in fracture toughness specimens. *Measurement of Crack Length and Shape during Fracture and Fatigue*, (págs. 393- 399). West Midlands.
- Mudge, P., & Duncumb, A. (1985). Proceedings of the 20th Annual British Conference. *NDT of steel bridges*, (págs. 321 - 333). Warley.
- Nottingham, L., & MacDonald, D. (1990). Proceedings of the 10th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries,. *Time-of-flight diffraction ultrasonic measurement of igscc in generator retaining rings*, (págs. 597-601). Glasgow.
- Ogilvy, J. A. (1987). On the theory of ultrasonic wave scattering from rough surfaces. *Reports on progress in physics*.
- Ogilvy, J., & Temple, J. (1983). *Diffraction of elastic waves by cracks: Application to time-of-flight inspection*. Reino Unido: Diffraction of elastic waves by cracks: Application to time-of-flight inspection.
- Ramsdale, S. A. (1983). Diffraction of elastic waves by rough semi-infinite cracks. *Ph.D. thesis, University of Manchester*.

- Scruby, C., Dewhurst, R., Hutchins , D., & Palmer, S. (1982). *Laser generation of ultrasound in metals*. Londres: Research Techniques in Nondestructive Testing.
- Shull, P. (2002). *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*. Hutgasse: Marcel Dekker, Inc.
- Sigmond, R., & Lien, E. (1980). Ultrasonic diffraction measurements of fatigue crack growht. *British Journal Non Destructive Testing*, 281-283.
- Silk, M. G. (1979). The transfer of ultrasonic energy in the geometry of the diffraction. *Ultrasonics*.
- Silk, M., Hillier, G., & Robertson, N. (1986). *Investigation of the use of horizontally polarized shear waves for TOFD studies on austenitic steel*. Harwell.
- Smilie, R. (1997). *Nondestructive Testing Ultrasonic*. South Harrisburg: PH Diversified, Inc.
- Stringfellow, M., & Temple, J. A. (1987).
- Taylor, F. (1919). *The principles of Scientific Management*. New York: Harper & Brothers Publishers.
- Verkooijen, J. (1995). TOFD used to replace radiography. *Insight*, 433-435.
- Yokote, , Y., Ishizuka, T., Bagdasarian, A., Gougler , & Stellina, R. (1994). Detection and sizing of defects in heavy wall pressure vessel welds. *Determining Material Characterization: Residual Stress and Integrity with NDE*,, PVP-vol 276, págs. 125-132. Minnesota.